

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI ORANLARDA BOR İLAVE EDİLMİŞ AISI 4140
(42CrMo4) ISLAH ÇELİĞİNİN ISIL İŞLEMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

**Tezi Hazırlayan
Pınar ATA ESENER**

**Tezi Yöneten
Yrd. Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Ağustos 2017
NEVŞEHİR**

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI ORANLARDA BOR İLAVE EDİLMİŞ AISI 4140
(42CrMo4) ISLAH ÇELİĞİNİN ISIL İŞLEMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

**Tezi Hazırlayan
Pınar ATA ESENER**

**Tezi Yöneten
Yrd. Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Ağustos 2017
NEVŞEHİR**

Yrd. Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA danışmanlığında Pınar ATA ESENER tarafından hazırlanan “Farklı Oranlarda Bor İlave Edilmiş AISI 4140 (42CrMo4) İslah Çeliğinin Isıl İşlemi ve Karakterizasyonu” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

07/08/2017

JÜRİ

Başkan : Prof. Dr. Bülent KURT

Üye : Doç. Dr. Bilal DEMİREL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA



ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun. **8/8/2017**..tarih ve.. **36-270**.. sayılı kararı ile onaylanmıştır.

178/2017

Prof. Dr. Şahlan ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü



TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Pınar ATA ESENER

TEŞEKKÜR

Bilgilerini ve tecrubesini esirgemeyen, her konuda anlayıő gösteren, sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA'ya teőekkürlerimi sunarım.

Aynı laboratuvarıda çalışma arkadaőım olan Lütfullah ÖZDOĞAN'a, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Serkan DAL'a yardımları için teşekkür ederim.

Tez çalışmasında maddi destek veren Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: NEÜLÜP15/2F15) teşekkür ederim.

Bu süreç içerisinde hiçbir zaman maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, her daim yanımda olan hayat arkadaőım Muhammet Ali Esener'e gösterdiği sabırdan ötürü teşekkür ederim.

FARKLI ORANLARDA BOR İLAVE EDİLMİŞ AISI 4140 (42CrMo4) ISLAH ÇELİĞİNİN ISIL İŞLEMİ VE KARAKTERİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Pınar ATA ESENER

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Ağustos 2017

ÖZET

Islah çeliklerden AISI 4140 çeliği (42CrMo4) otomobil-inşaat-ziraat makine parçaları, takım tezgâhları, uçak parçaları, akslar, krank milleri ve dişliler gibi birçok kullanım alanları bulmaktadır. Farklı oranlarda (2, 11, 17, 26, 32, 38 ppm) vakumsuz indüksiyon ocağında bor ilave edilmiş numunelere ısıtılma işlemi uygulanmış ve ısıtılma işlemi uygulanmamış olarak incelenmiştir. Isıtılma işlemleri buzlu su, su, yağ, oda sıcaklığı ve fırın olmak üzere beş farklı ortamda gerçekleştirilmiştir. Isıtılma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış numunelerde farklı oranlarda bor ilavesinin mikroyapılarına da belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. Yapılan SEM incelemeleri neticesinde 26 ppm bor içeren numunelerin BN parçacıklarına rastlanmıştır ve XRD çalışmaları da bunu desteklemiştir. Isıtılma işlemi uygulanmış numunelerde buzlu su ve su da optimum değer olan 15-25 ppm bor içeren numunelerde mikrosertlik değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir. Yapılan çalışmalar literatür ile karşılaştırılarak tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: AISI 4140 Çeliği, Borlu Çelik, Isıtılma İşlemi, Mikroyapı.

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA

Sayfa Adeti: 82

**HEAT TREATMENT AND CHARACTERIZATION OF BORON ADDED AISI 4140 (42CrMo4) QUENCHED & TEMPERING STEEL AT DIFFERENT RATES
(M. Sc. Thesis)**

Pınar ATA ESENER

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

August 2017

ABSTRACT

AISI 4140 (42CrMo4) steel from quenched & tempering steel finds many uses such as automobile-construction-agriculture machine parts, machine tools, aircraft parts, axles, crankshafts and gears. The samples with boron added at different ratios (2, 11, 17, 26, 32, 38 ppm) were examined to heat treatment and untreated. Heat treatments were carried out in five different environments: ice water, water, oil, room temperature and oven. At different ratios in the heat treated and untreated samples, no significant change in the microstructure of the boron additions was observed. As a result of the SEM investigations made, BN particles of samples containing 26 ppm boron were found and XRD studies supported this. It has been observed that the samples with heat treatment have increased microhardness values in samples containing 15-25 ppm boron which is optimum in ice water and water. The studies made are discussed in comparison with the literature.

Keywords: AISI 4140 Steel, Boron Steel, Heat Treatment, Microstructure.

Thesis Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA

Page Number: 82

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
GİRİŞ	1
BÖLÜM 1	
BOR İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER	4
1.1. Bor ve Mineralleri	4
1.2. Bor Elementinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	4
1.3. Borun Tarihçesi	4
1.4. Bor Bileşiklerinin Genel Özellikleri.....	5
1.4.1. Boraks dekahidrat	6
1.4.2. Boraks pentahidrat.....	6
1.4.3. Susuz boraks	7
1.4.4. Borik asit	7
1.4.5. Borik asit (Susuz borik asit)	7
1.4.6. Sodyum perborat	8
1.4.7. Bor karbür.....	8
1.4.8. Bor nitrit	8
1.4.9. Bor halojenürler.....	8
1.5. Dünya Bor Rezervleri.....	9
1.6. Borun Genel Kullanım Alanları	9
1.6.1. Cam elyafında kullanımı	10
1.6.2. Borosilikat camlarda kullanımı	10
1.6.3. Seramikte kullanımı.....	11
1.6.4. Tarımda kullanımı	11
1.6.5. Temizleme ve beyazlatma sanayinde kullanımı.....	12

1.6.6.	Alev geciktiriciler	12	
1.6.7.	Cam sanayide kullanımı	13	
1.6.8.	Metalürji alanında kullanımı	13	
1.6.9.	Bor fiberleri	14	
1.6.10.	Nükleer uygulamalarda kullanımı	14	
1.6.11.	Enerji depolamada kullanımı.....	15	
1.6.12.	Yakıtta kullanımı	15	
1.6.13.	Sağlık alanında kullanımı	15	
1.6.14.	Atık temizlemede kullanımı	16	
1.6.15.	İnşaat-çimento sektöründe kullanımı	16	
1.6.16.	Ahşap korumada kullanımı.....	16	
1.6.17.	Diğer kullanım alanları.....	16	
BÖLÜM 2			
ÇELİKLER VE AISI 4140 ÇELİĞİ			18
2.1.	Çelik	18	
2.2.	Demir-Karbon Denge Diyagramı	19	
2.3.	Kimyasal Bileşimlerine Göre Çeliklerin Sınıflandırılması	22	
2.3.1.	Karbon oranına göre çelik (alaşimsız çelik).....	22	
2.3.1.1.	Sade karbonlu çelik	22	
2.3.1.2.	Orta karbonlu çelik	23	
2.3.1.3.	Yüksek karbonlu çelik.....	24	
2.3.2.	Alaşımli çelik.....	24	
2.3.2.1.	Az alaşımli çelik	25	
2.3.2.2.	Yüksek alaşımli çelikler	25	
2.3.2.3.	Mikroalaşımli çelikler	25	
2.4.	Alaşım Elementlerinin Etkisi	26	
2.4.1.	Karbon	26	
2.4.2.	Mangan	26	
2.4.3.	Silisyum.....	26	
2.4.4.	Kükürt.....	27	
2.4.5.	Fosfor.....	27	
2.4.6.	Krom.....	27	
2.4.7.	Nikel	27	

2.4.8.	Molibden.....	28	
2.4.9.	Vanadyum.....	28	
2.4.10.	Wolfram.....	28	
2.4.11.	Niobyum	28	
2.4.12.	Titanyum.....	29	
2.4.13.	Kobalt	29	
2.4.14.	Alüminyum.....	29	
2.4.15.	Bor	29	
2.4.16.	Bakır	29	
2.4.17.	Azot	29	
2.5.	Çelik Tipleri.....	30	
2.5.1.	Kalitesiz yumuşak çelikler	30	
2.5.2.	Kolay kaynak çelikleri.....	30	
2.5.3.	Yapı çelikleri	31	
2.5.4.	İmalat çelikleri.....	31	
2.5.5.	İslah çelikleri	32	
2.5.6.	Soğuk çekme çelikler (transmisyon çelikleri)	32	
2.5.7.	Paslanmaz çelikler	33	
2.5.8.	Takım çelikleri.....	33	
2.6.	AISI 4140	34	
BÖLÜM 3			
BORLU ÇELİKLER.....			39
3.1.	Demir-Bor Bileşikleri.....	39	
3.1.1.	Demir-Bor denge diyagramı.....	39	
3.1.2.	Ferrobör	40	
3.1.3.	Çelik üretiminde ferrobörün önemi	40	
3.1.4.	Serbest bor (efektif bor).....	41	
3.1.5.	Bor oksit	42	
3.1.6.	Bor nitrür	42	
3.1.7.	Bor karbür.....	43	
3.1.7.1.	Bor karbürün yapısı	44	
3.2.	Borlu Çeliklerin Kullanım Alanları.....	45	
3.3.	Borlu Çeliklerin Mekanik ve İşlenebilme Özellikleri	46	

BÖLÜM 4

ISIL İŞLEM	47
4.1. Çeliklerin Isıl İşlemi	47
4.1.1. Tavlama	47
4.1.1.1. Normalizasyon.....	47
4.1.1.2. Gerilme giderme	48
4.1.1.3. Yumuşatma.....	48
4.1.1.4. İri tane tavlaması	48
4.1.1.5. Difüzyon tavlaması.....	49
4.1.1.6. Küreselleştirme	49
4.1.2. Sertleştirme.....	49
4.1.2.1. Isıtma	49
4.1.2.2. Bekletme	49
4.1.2.3. Soğutma.....	50
4.1.2.3.1. Perlit kademesinde dönüşüm	51
4.1.2.3.2. Beynit kademesinde dönüşüm.....	51
4.1.2.3.3. Martenzit kademesinde dönüşüm	52
4.1.3. Islah etme.....	53
4.1.3.1. Su verme.....	53
4.1.3.1.1. Su ortamında sertleştirme	53
4.1.3.1.2. Yağ ortamında sertleştirme.....	54
4.1.3.1.3. Tuz banyosunda sertleştirme	54
4.1.3.1.4. Havada sertleştirme	54

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	55
5.1. Çalışma Sistematiği	55
5.2. Malzeme Seçimi	55
5.3. Isıl İşlem Aşamaları.....	56
5.4. Metalografik İşlemler	57
5.4.1. Numunelerin kesilmesi	57
5.4.2. Bakalite alma	57
5.4.3. Numunelerin zımparalanması ve parlatılması	58
5.4.4. Numunelerin dağlanması.....	59

5.5.	Optik Mikroskop ile İnceleme.....	60
5.6.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	60
5.7.	X-Işını Kırınımı (XRD).....	61
5.8.	Mikrosertlik testi	62
BÖLÜM 6		
DENEYSEL SONUÇLAR		64
6.1.	Karakterizasyon Çalışmaları	64
6.1.1.	Mikroyapı incelemeleri	64
6.1.1.1.	Optik mikroyapı sonuçları ve tartışma	64
6.1.1.2.	SEM-EDS sonuçları ve tartışma.....	66
6.1.2.	XRD analizi sonuçları ve tartışma.....	67
6.2.	Isıl İşlem	68
6.2.1.	Optik mikroyapı sonuçları ve tartışma	68
6.2.2.	Mikrosertlk sonuçları.....	75
BÖLÜM 7		
SONUÇ-TARTIŞMA ve ÖNERİLER.....		77
KAYNAKLAR		79
ÖZGEÇMİŞ		82

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	Dünya bor rezervleri.....	9
Tablo 2.1.	Az karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları	22
Tablo 2.2.	Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları	23
Tablo 2.3.	Yüksek karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları.....	24
Tablo 2.4.	Alaşım elementlerinin alt sınırı	30
Tablo 2.5.	AISI 4140 çeliğinin kimyasal bileşimleri.....	35
Tablo 2.6.	AISI 4140 çeliğinin genel özellikleri	35
Tablo 2.7.	AISI 4140 çeliğinin mekanik özellikleri	36
Tablo 2.8.	AISI 4140 çeliğinin ısı ve elektriksel özellikleri.....	36
Tablo 2.9.	AISI 4140 çeliğinin ısı işlem özellikleri.....	36
Tablo 3.1.	Bor nitrür ticari kalite sınıflandırması	43
Tablo 5.1.	Asil Çelik A.Ş./Bursa tarafından verilen numunenin % ağırlık olarak kimyasal analizi	56
Tablo 6.1.	Farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliğinin buzlu suda, suda, yağda, havada ve fırında soğutulması sonucunda elde edilen mikrosertlik değerleri.....	75

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Bor ürünleri ve bileşiklerinin şematik gösterimi	6
Şekil 1.2.	Bor tüketiminin nihai kullanım alanlarına göre dağılımı	10
Şekil 2.1.	Demir- Karbon denge diyagramı.....	19
Şekil 2.2.	AISI 4140 çeliğine ait TTT diyagramı	37
Şekil 2.3.	AISI 4140 çeliğine ait CCT diyagramı.....	38
Şekil 3.1.	Demir-bor denge diyagramı	39
Şekil 3.2.	Östenitten ferrite dönüşümü esnasında tanelerde meydana gelen değişiklik	42
Şekil 4.1.	Östenitin soğuma hızına bağlı olarak yaptığı dönüşümler	50
Şekil 4.2.	Sertleştirme işlemi ile ortaya çıkan perlit yapısı	51
Şekil 4.3.	(a) İğneli ve (b) taneli beynit yapısı	52
Şekil 4.4.	Sertleştirme işlemi ile ortaya çıkan martenzit yapısı	52
Şekil 5.1.	Deneysel çalışma sistematığının şematik gösterimi	55
Şekil 5.2.	Isıl işlem fırını	56
Şekil 5.3.	Hassas kesme cihazı	57
Şekil 5.4.	Otomatik bakalite alma cihazı	58
Şekil 5.5.	Zımparalama-parlatma cihazı	58
Şekil 5.6.	Numuneleri zımparalama da kullanılan diskler.....	59
Şekil 5.7.	Optik mikroskop ve görüntü sistemi	60
Şekil 5.8.	Taramalı elektron mikroskopunun (SEM) fotoğrafı.....	61
Şekil 5.9.	X-Işını kırınımı cihazı	62
Şekil 5.10.	Mikrosertlik ölçüm cihazı.....	63
Şekil 6.1.	Farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliğinin optik mikroyapıları (a) 2 ppm, (b) 11 ppm, (c) 17 ppm, (d) 26 ppm, (e) 32 ppm, (f) 38 ppm	65
Şekil 6.2.	Borsuz (2 ppm) numunelerin SEM görüntüsü ve noktasal analizleri.....	66
Şekil 6.3.	26 ppm bor içeren numunelerin SEM görüntüsü ve noktasal analizleri .	66
Şekil 6.4.	Borsuz AISI 4140 çeliğinin XRD grafiği.....	67
Şekil 6.5.	26 ppm bor içeren AISI 4140 çeliğinin XRD grafiği.....	68
Şekil 6.6.	Buzlu suda soğutulmuş farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliklerinin mikroyapıları (a) 2 ppm, (b) 11 ppm, (c) 17 ppm, (d) 26 ppm, (e) 32 ppm, (f) 38 ppm	70

Şekil 6.7.	Suda soğutulmuş farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliklerinin mikroyapıları (a) 2 ppm, (b) 11 ppm, (c) 17 ppm, (d) 26 ppm, (e) 32 ppm, (f) 38 ppm.....	71
Şekil 6.8.	Yağda soğutulmuş farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliklerinin mikroyapıları (a) 2 ppm, (b) 11 ppm, (c) 17 ppm, (d) 26 ppm, (e) 32 ppm, (f) 38 ppm.....	72
Şekil 6.9.	Oda sıcaklığında soğutulmuş farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliklerinin mikroyapıları (a) 2 ppm, (b) 11 ppm, (c) 17 ppm, (d) 26 ppm, (e) 32 ppm, (f) 38 ppm	73
Şekil 6.10.	Fırında soğutulmuş farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliklerinin mikroyapıları (a) 2 ppm, (b) 11 ppm, (c) 17 ppm, (d) 26 ppm, (e) 32 ppm, (f) 38 ppm.....	74

GİRİŞ

Geçmişten günümüze kadar en çok kullanılan metaller arasında yer alan çelik, teknoloji ve bilimin gelişmesiyle ülkeler arasında otomotiv, inşaat, uzay, sağlık, tarım gibi pek çok alanda kullanılmak üzere ilk sırada tercih edilenler arasında yer almaktadır. Çelik, gelişmiş ve gelişmekte olan bir ülkenin, kalkınması ve ekonomik anlamda dünya da önemli bir yere sahip olması için göz ardı edilemez bir faktördür. Son zamanlarda incelenen raporlara bakıldığında dünya genelinde çelik üretiminin ne kadar önem teşkil ettiği görülmektedir. Batı Avrupa çelik üreticisi olan Türkiye ise 2016 yılında bir önceki yıla kıyasla dünyanın en büyük sekizinci ülkesi haline gelmiştir.

Dünyada ticari olarak önemli bor ve minerallerine sahip ülkeler arasında Türkiye, Güney Amerika, ABD ve Rusya vardır. Ülkemizin sahip olduğu doğal kaynakların başında gelen bor, sektörler içerisinde en çok tercih edilen ürün haline gelmiştir. Bor ürünlerinin kullanımına yönelik çalışmalar gün geçtikçe artış göstermektedir. Çeliklere bor ilavesi de buna en büyük örnek olarak gösterilebilir. Çelikler geliştirilerek daha elverişli kullanımlar haline getirilmektedir. Bor doğada tüm canlıların yaşamlarını devam ettirebilmeleri için önemli elementlerden biridir. Bor ve bileşikleri özellikle malzeme alanında kullanılmasıyla ve teknolojik gelişmeler sonucuyla stratejik bir maden olmuştur[1].

Bor çeliklerde çok az çözünürlüğe sahip olup, sertleşebilirlik ve dönüşüm karakterleri üzerine önemli bir etkiye sahip olması nedeniyle metallere çok büyük avantaj sağlamaktadır. Bor ve bileşiklerinin metalik malzemelere sağladıkları yararlar; yüksek ısıya dayanım, yüksek mukavemet, yüksek manyetik geçirgenlik, yüksek elastiklik, yüksek yüzey koruma, yüksek kronolojik sıcaklığa dayanım, yüksek iletkenlik, yüksek aşınma ve korozyona dayanım, yüksek ısı transferi, yüksek soğurma, yüksek yapışma ve tutunma gibi özellikler kazandırmaktadır [2].

1935 yıllarında borlu çeliklerle ilgili çalışmalar başlamıştır. 1941 yılında borlu çeliklerin gelişimi, Jominy test metodunun bulunması ve II. Dünya Savaşının başlamasıyla artmıştır.

Pazarlıoğlu, S. 2006 yılında ilerinde AISI 4140 eliğini de bulunduran farklı türdeki çeliklerin yüzeylerine niobyum borür kaplama uygulamıştır. Kaplama işlemine, borlama işlemine boraks, borik asit ve ferro-silisyumdan oluşan sıvı borlama banyosunda gerçekleştirmiştir. Kaplanan numunelerin morfolojik, mekanik ve yapısal karakterizasyonlarını incelemiş ve rapor etmiştir [3].

Subaşı, M. ve Karataş, . 2010 yılında “AISI 4140 eliğinde Sertlik, Yorulma Dayanımı İlişkisi” isimli çalışmaların da AISI 4140 elik malzemesini, CNC tezghında tornalayarak standart yorulma deney numuneleri elde etmişler ve numune gruplarının yorulma dayanımı seviyelerini yapılan deneyler sonucunda tespit etmişlerdir [4].

arboğa, C., 2010 yılında doktora tez çalışmasında, yapı ve inşaat çeliği olarak kullanılan 1020 çeliğine değişik oranlarda bor ilave edilmiş esas malzeme ile değişik oranlarda bor ilave edilmiş çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Uygun koşullarda haddelenen borlu çeliklerin ve esas malzemenin mikroyapısal özellikleri, çekme dayanımları, sertlik değerleri ve çentik darbe dayanımlarını karşılaştırmıştır. Esas malzeme ile değişik oranlarda üretilen bor ilave edilmiş çeliklerin çentik darbe dayanımları, sertlik değerleri ve çekme dayanımlarında oluşan farkları, mikroyapı ile de ilişkilendirmiştir [5].

lmez E., 2014 yılında yüksek lisans tezinde döküm yöntemiyle üretilen AISI 304 paslanmaz elik malzemeye Al-5Ti-1B master alaşımı ve ferrobora ilave ederek mekanik özelliklerin, mikro yapının ve aşınma davranışının geliştirilmesini amaçlamıştır. Bunun için AISI 304 paslanmaz elik malzeme üretmiş, üretim sırasında Al-5Ti-1B master alaşımından ve ferrobora malzemedan farklı oranlarda ilave etmiş, 800 C, 900 C ve 1000 C’de 1 saat homojenleştirme uygulamıştır. Numunelerin mikroyapısı, aşınma yüzeyleri ve kırılma modları, optik mikroskop, SEM, X-ışını kırınım analizi yapmıştır. % 0.005 bor içeren ve 1000 C homojenleme uygulanan numunenin en sert malzeme olduğunu rapor etmiştir. Ayrıca alaşımlı malzemelerde bor nitrür (BN) tespit etmiştir [6].

Hke, G., şahin i., inici, H. ve Fındık, T. 2014 yılında “Kriyojenik İşlemin SAE 4140 eliğin Mekanik zellikleri zerine Etkisi” adlı çalışma da kriyojenik soğutma işleminin SAE 4140 eliğinin mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir.

Mikrosertlik incelemeleri ve çekme deneyi sonucunda, kriyojenik işlem, ıslah işlemi ve menevişleme işlemi uygulanmış numunelerde tokluğun arttığını ve kriyojenik işlemin, mikrosertlik üzerinde de pozitif bir etkiye sahip olduğu sonucunu bildirmişlerdir [7].

Bor çelikleri, gittikçe daha popüler ve uygulamaları daha çeşitli hale gelmekte, yüksek özellikleri, makul bir fiyatta gelişmiş imalat teknolojisiyle elde edilmektedir. Bor çelikleri esas olarak sert aşınmaya dirençli elemanlar için tasarlanmış olmasına rağmen şimdi daha geniş uygulamalar için de kullanılmaktadır [8,9]. Çeliklerin sertleşebilirliğini arttırmanın yanı sıra, borun son zamanlarda çeliklerin mekanik özelliklerini geliştirdikleri de gözlenmiştir [10-12]. Doğal gaz boru hatlarında kullanılan yapı çelikleri ve yapısal çelikler için gerekli olan mekanik özellikler klasik üretim yöntemlerinde bazı ayarlamalar yapılarak elde edilebilir. Örneğin, bu çeliklerin mekanik özellikleri, mikro seviyelerde (maksimum 500 ppm) niobyum ve vanadyum eklenerek modifiye edilir. Bunlar pahalı elemanlar olduğu için uygulamaları ek işlemler gerektirir [13-17]. Karşılaştırılabilir özelliklerin daha uygun bir şekilde elde edilmesi için ek işlemlere gerek duyulmaksızın, niobyum ve vanadyum yerine boron ilavesi makul bir yöntem gibi gözükmemektedir.

Yapılan bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan AISI 4140 çeliğine bor ilave edilmiş ve ısıtılma işlem davranışları, mikroyapı ve mikrosertlik özellikleri üzerine detaylı bir çalışma amaçlanmıştır. AISI 4140 çeliği yaygın olarak otomobil, inşaat ve tarım makineleri parçaları, takım tezgâhları, uçak parçaları, dingil, krank mili ve dişli gibi çok sayıda alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmayla, AISI 4140 çeliğine bor ilavesiyle ilgili çalışmalara pek rastlanmadığı için özgün bir çalışma olduğu ve bu sebeple mikroyapı ve mikrosertlik özelliklerinin geliştirilmesi ile Türkiye ve dünya çelik sektörüne katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

BÖLÜM 1

BOR İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

1.1. Bor ve Mineralleri

Bor, atom numarası 5, atom ağırlığı 10.81, yoğunluğu 2.84 gr/cm^3 olan, doğada serbest halde bulunmayan daima bileşik halinde bulunan, sembolü “B” olup periyodik cetvelin III A grubunun metalle ametal arası yarı iletken özelliklere sahiptir. Ergime noktası $2300 \text{ }^\circ\text{C}$ ve kaynama noktası $2550 \text{ }^\circ\text{C}$ olan, yeryüzünde yaklaşık 230 çeşit bor minerali bulunduran bir elementtir. Minarellerden bazıları; Kolemanit, Tinkal, Üleksit, Pandermit, Kernit, Sasolit, Ascharit ve Datolit’tir. Türkiye de ticari anlamda değerli olan Pandermit, Kolemanit, Tinkal ve Üleksit mineralleri bulunmaktadır.

1.2. Bor Elementinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Bor, oda koşullarında kararlı, $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ve üstü sıcaklıklarda yükseltgenerek farklı oksitler oluşturur. Sulu ortamda çözünmez, kaynatıldığında oksitlerine çok az dönüşerek yavaşça çözünür. Bor, nitrik asit hariç 12 mineral asitlerine karşı da oldukça dayanıklıdır. Bor oksitleri veya elementel bor, $1250\text{-}1600 \text{ }^\circ\text{C}$ gibi yüksek sıcaklıklar arasında kömür tozu gibi karbonlu bileşiklerle vakumlu ortamda işleme tabi tutulduğunda bor karbüre dönüşmektedir. Ayrıca, elmasın sonra en sert malzeme olarak bilinen kübik bor nitrürü oluşturmak için yüksek sıcaklık ve yüksek basınç gibi ilave şartlar gerekir.

Bor, tutuşma sıcaklığı ve yanıcılığı yüksek, yanma sonucunda rahatlıkla aktarılabilecek katı ürün vermesi ve çevreye zarar verecek emisyon açığa çıkarmaması gibi bir özelliğe sahip olduğundan ötürü katı yakıt hücresi olarak kullanılmaktadır.

1.3. Borun Tarihçesi

Eski zamanlarda bor mineralleri içerisinde ticareti yapılan ilk madde boraktır. Mezopotamya Uygarlıkları ve Mısırlılar, bazı hastalıkları tedavi etmek ve ölüleri mumyalamak, Çinliler porselenleri cilalamak, Babilliler ise kıymetli metalleri eritmek amacıyla boraksı tercih ettikleri bilinmektedir.

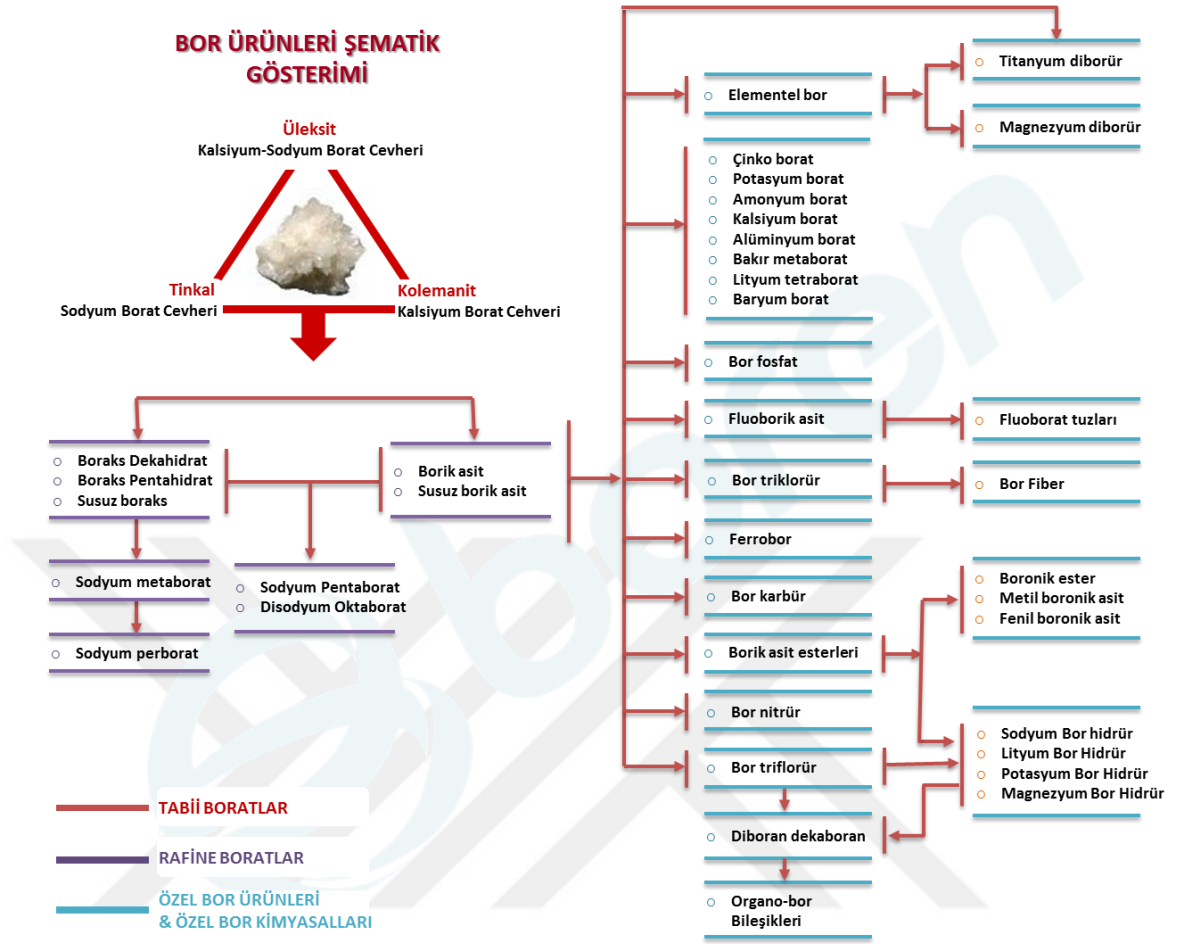
13. yy.'da Marco Polo tarafından Tibet'den Avrupa'ya getirilen boraks ile modern bor endüstrisi başlamıştır. 1771 yılında, İtalya'nın Tuscani bölgesindeki sıcak su kaynaklarında Sassolit bulunduğu anlaşılmış. 1852'de Şili'de endüstriyel alanda ilk boraks madenciliği başlamıştır. California, Caliko Mountain, Nevada ve Kramer bölgesindeki yatakların işletilmesiyle ABD dünya bor ihtiyacını karşılayan birinci ülke haline gelmiştir. 1861 yılında çıkartılan "Maadin Nizannamesi" uyarınca Türkiye' deki ilk işletme, 1865 yılında bir Fransız şirketine işletme imtiyazı verilmesiyle başladığı bilinmektedir.

Özel alaşımlı çeliklerin dökümlerinde çok eskiden beri çeşitli deoksidasyon vasıtaları kullanıldığı bilinmektedir. Bu deoksidasyon vasıtalarındaki elemanların çelik alaşımlarının kimyasal- fiziksel özellikleri ve dokuları üzerine yaptığı etkiler ise daha sonra anlaşılmıştır. Bor elemanı da bunların arasındadır.

İlk defa 1938 yılında, Kompleks deoksidasyon bileşiklerinin çeliklerin sertleşme özelliklerine de tesir ettiği görülmüş ve bu olayın tespitinden sonra da sistemli araştırmalara koyularak sonunda çeliğe bor elemanının ilavesi ile çeliklerin sertleşme derinliğinin ve sertlik alma kabiliyetinin arttığı ortaya çıkarılmıştır. Bilhassa ikinci dünya harbinde Birleşik Amerika Devletinde ve Sovyet Sosyalist Cumhuriyetlerinde çeliklerin sertleşme özelliğini arttırmak için kullanılan yüksek değerdeki alaşım elemanlarından tasarruf edebilmek için yeni bor alaşımlı çeliklerin meydana getirilmesi çalışılmıştır [18].

1.4. Bor Bileşiklerinin Genel Özellikleri

Bor bileşikleri eski çağlardan günümüz teknolojisine kadar kullanılmıştır. Bor ve bileşikleri özellikle metalurji ve malzeme alanında kullanılması ve teknolojik gelişmeler sonucu stratejik bir maden olmuştur [16]. Bor ürünleri ve bileşiklerinin şematik gösterimi Şekil 1.1. de verilmiştir.



Şekil 1.1. Bor ürünleri ve bileşiklerinin şematik gösterimi [19]

1.4.1. Boraks dekahidrat

Teknolojik olarak alkali metal boratlarının en önemlilerinden biri, tabiatta tinkal minerali olarak bulunan disodyum tetraborat dekahidrat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) olarak da adlandırılan boraks dekahidrattır. Molekül ağırlığı 381.4 gr/mol, oda sıcaklığında özgül ağırlığı 1.71 ve özgül ısısı 0.385 kcal/gr $^{\circ}\text{C}$, oluşum ısısı ise -1497.2 kcal/mol'dür. Monoklinik kristal yapısında renksiz bir tuzdur. Sulu çözeltileri yaklaşık, konsantrasyondan bağımsız olarak hafif alkali reaksiyon gösterir. Doymun boraks çözeltisi 105 $^{\circ}\text{C}$ 'de kaynar.

1.4.2. Boraks pentahidrat

Disodyum tetraborat pentahidratın ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) molekül ağırlığı 291.35 gr/mol'dür, Oluşum ısısı -1143.5 kcal/mol, özgül ağırlığı 1.88 ve özgül ısısı 0.316 kcal /gr $^{\circ}\text{C}$ 'dir.

Mineral adıyla tinkalkonit olan pentahidrat boraksın dehidrasyonundan oluşan birikintiler halinde bulunur. Doymuş boraks çözüntüsünün 60 °C'nin üzerinde kristallenmesi ile oluşur.

1.4.3. Susuz boraks

Disodyum tetraborat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) molekül ağırlığı 201.27 gr/mol'dür. Oluşum ısısı -783.2 kcal/mol, özgül ağırlığı 2.3 gr/cm³ olan çok sert renksiz bir kristaldir. Kolay öğütülebilir kristalin bir kütlesi olarak bulunur. Ergime noktası 741 °C'dir. Boraks hidratların 600-700 °C arasında dehidrasyonu ile stabil yapıda susuz boraks üretimi sağlanabilmektedir.

1.4.4. Borik asit

Molekül ağırlığı 61.83 gr/mol, B_2O_3 içeriği % 56.3 ve ergime noktası 169 °C'dir. Oluşum ısısı -1089 kJ/mol, özgül ağırlığı 1.44 ve çözünme ısısı 22.2 kJ/mol olan kristal yapıda maddedir. Sudaki çözünürlüğü oda sıcaklığında az olmasına rağmen, sıcaklık arttıkça çözünürlüğü de önemli derecede artmaktadır. Bu sebeple sanayide borik asidi kristallendirmek için genellikle doymuş çözeltiyi 80 °C'den 40 °C'ye soğutmak yeterli olmaktadır. Bor minerallerinden üretilen borik asit cam, seramik ve cam yünü sanayiinde başta olmak üzere kullanılmakta olup, kullanım alanları geniştir. Borik asit, genellikle bor minerallerinin sülfürik asit ile asitlendirilmesi ile elde edilmektedir.

1.4.5. Borik asit (susuz borik asit)

Renksiz cam görünümlü ticari bor oksit B_2O_3 genellikle % 1 oranında su içerir. Uygun sıcaklıkta borik asitten su kaybettirilerek elde edilir. Oda sıcaklığında higroskopiktir. Bor oksit ve susuz boraks genellikle cam sanayiinde çok kullanılır. Yüksek sıcaklıkta borik asitten su buharlaşırken B_2O_3 kaybı artmaktadır. Cam üretim aşamasında, borik asit yerine, bor oksit tercih edilmesi enerji ve hammadde avantajı sağlamaktadır. Bor oksit çeşitli camlarda, porselen sırlarının hazırlanmasında, seramik kaplamalarda ve ergitme işlemlerinde kullanılır. Bunun yanı sıra pek çok organik reaksiyonun katalizörüdür ve birçok bor bileşiğinde başlangıç maddesidir.

1.4.6. Sodyum perborat

Sodyum perborat ($\text{NaBO}_2\text{H}_2\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) genellikle tetrahidrat yapısındadır. Perborat üretiminde % 33 oranında B_2O_3 boraks minerali kullanılmaktadır. Sodyum perborat, Bandırma'daki Eti Bor A.Ş. Boraks ve Asit Fabrikaları İşletmeleri tarafından üretilmektedir. Sodyum perborat, ağartıcı etkisiyle yaygın olarak sabun- deterjan sanayiinde kullanılmaktadır. Ayrıca kozmetikte, tekstil endüstrisinde, reçine, mum, tutkal ve sünger yapımında katkı maddesi olarak tercih edilmektedir.

1.4.7. Bor karbür

Bor karbür bor karbon sistemindeki tek bileşiktir ve genellikle granür katı olarak elde edilir. Masif ürün olarak elde edilmek istendiğinde, 1800- 2000 °C arasında grafit kalıplarda preslenir. Parlak görünümde olan saf bor karbürün, yoğunluğu 2.52 gr/cm^3 ve ergime sıcaklığı 2450 °C'dir. Sıcak preslenmiş bor karbür, contalarda, seramik zırlı yüzeylerin yapılmasında ve aşındırıcı parçalarda kullanılır. 2000 °C'nin üzerindeki sıcaklıkların ölçülmesinde termal çift olarak kullanılır. Sertliğinden ötürü abrasif malzeme yapımında kullanılırken, nükleer reaktörlerde nötron yakalama kapasitesi, kimyasal inertliği ve radyasyon stabilitesi gibi özelliklerinden yararlanır.

1.4.8. Bor nitrit

Genellikle hegzagonal yapıda oluşan bor nitrit, hegzagonal sistemde iken beyaz, talka (doğal magnezyum silikat) benzeyen, 2.27 gr/cm^3 yoğunluğunda bir tozdur. Kübik sistemde ise bir hayli serttir. İyi bir elektrik izolatörüdür ve teorik yoğunluğu 3.45 gr/cm^3 'tür. Ergitilerek masifleştirildiğinde büyük bir kimyasal dirence sahiptir. Kübik yapıdaki bor nitrit çok iyi bir abrasif malzemedir. Kesici aletlerin yapımında ve sert alaşımların işlenmesinde bu özelliğinden faydalanılmaktadır.

1.4.9. Bor halojenürler

Borun flor, brom, klor, iyot gibi halojenlerle yaptığı bileşiklerdir. Bor klorür, düşük viskoziteli, renksiz, ışığı kıran bir sıvı olduğu için % 95'i bor-fiber üretiminde kullanılır. Bor florür ise boğucu kokulu, yanıcı olmayan renksiz bir gazdır. Bor iyodür oksijen akımında yanan, katı ve kuvvetli nem çekicidir.

Bor halojenürler metalik karaktere sahip bor bileşikleridir. Metallerle veya metaloksitler ile borun reaksiyonu sonucu elde edilirler. Ticari olarak metal karışımların ve borun; alüminyum, magnezyum veya karbon ile indirgenmesi ile elde edilirler. Boridler yüksek sertliğe, yüksek ergime noktasına ve iyi bir kimyasal stabiliteye sahiptirler. Oksidasyona karşı dirençli olduklarından dolayı, metal yüzeylerinin kaplanmasında, ısıya dayanıklı kazan ve buhar kazanları yapımında, korozyona dayanıklı malzeme üretiminde ve elektronik sanayinde kullanılırlar.

1.5. Dünya Bor Rezervleri

Türkiye, Rusya ve A.B.D dünyadaki önemli bor yataklarını bulunduran ülkelerdir. ABD Kaliforniya Eyaletinin güneyinde yer alan “Mojave Çölü”, Güney Amerika’da yer alan “And Kemerı”, Türkiye’nin de yer aldığı “Güney-Orta Asya Orojenik Kemerı” ve Doğu Rusya dünya ticari bor rezervleri bulunduran 4 bölgedir.

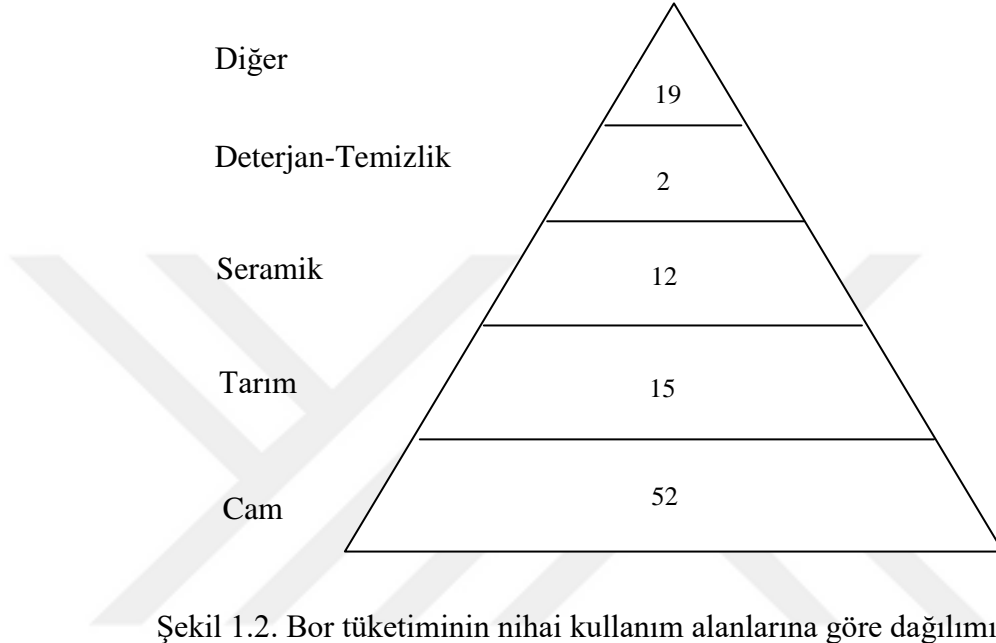
Tablo 1.1. Dünya bor rezervleri [20]

Ülke	Toplam Rezerv (Bin ton B ₂ O ₃)	Toplam Rezerv (% B ₂ O ₃)
Türkiye	955.297	72.1
A.B.D.	80.000	6.7
Rusya	100.000	8.4
Çin	47.000	3.9
Arjantin	9.000	0.8
Bolivya	19.000	1.6
Şili	41.000	3.4
Peru	22.000	1.8
Kazakistan	-	-
Sırbistan	16.200	1.3
İran	1.000	0.0
Toplam	1.199.700	100.0

1.6. Borun Genel Kullanım Alanları

Bor mineralleri ve bileşikleri birçok endüstri dallarında çeşitli malzeme ve ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. Bor bileşiklerinin kullanımı ve metalik malzemeler üzerine bor kaplama işlemi, insanlık tarihinin en eski teknolojilerinden olup bu güne kadar gelmiştir. Günümüzde bu kullanım alanları çok daha fazla genişlemektedir. Özellikle 400'den fazla endüstriyel alanlarda uygulama bulmaktadır [21]. Bor ürünleri uzay ve hava araçları, askeri araçlar, yakıtlar, elektronik ve iletişim sektörü, nükleer uygulamalar, tarım, cam sanayi, kimya ve deterjan sektörü, seramik ve polimerik

malzemeler, otomotiv ve enerji sektörü, nanoteknolojiler, metalürji ve inşaat gibi alanlarda sıklıkla tercih edilen malzemelerdir. Ancak tüketilen bor ürünlerinin % 80'e yakını cam, seramik- frit, tarım ve deterjan sektörlerinde yoğunlaşmıştır. Borun genel kullanım alanlarının % dağılımı oranları Şekil 1.2. de görülmektedir.



Şekil 1.2. Bor tüketiminin nihai kullanım alanlarına göre dağılımı [22]

1.6.1. Cam elyafında kullanımı

Hafifliği, maliyetinin düşüklüğü, iyi gerilme direnci ve kimyasal etkilere dayanıklılığı sebebiyle plastiklerde, lastik ve kâğıtta yer edinmiş olan cam elyaf, ilave edildiği malzemelere sertlik ve dayanıklılık vermektedir. Böylece sertleşmiş plastikler otomotiv, uçak, çelik ve diğer metallerin yerini doldurmaya başlamıştır. Ayrıca kayak, tenis raketi gibi spor malzemelerinde de kullanılmaktadır. Trafik işaretleri, karayolu onarımı gibi yeni kullanım alanları araştırmaların daha kapsamlı olacağını işaretidir. Bunun yanı sıra otomobillerde borun kullanılması, paslanmayı geciktirmekle birlikte arabaların ağırlığını azaltmakta ve sonucunda yakıt tüketimini azaltmaktadır.

1.6.2. Borosilikat camlarda kullanımı

Camın ısıya dayanmasını, cam imalatı sırasında çabuk erimesini ve devitrifikasyonun önlenmesini sağlayan bor; yansıtma, kırma, parlama gibi özelliklerini de arttırmaktadır. Bor, camı asite ve çizilmeye karşı korur. Cam tipine bağlı olarak; cam eriğinin % 0.5

ile % 0.23'ü bor oksitten oluşmaktadır. Örneğin Pyrex'de % 13.5 B₂O₃ vardır ve genellikle cama boraks, kolemanit, borik asit halinde karma olarak ilave edilmektedir.

1.6.3. Seramikte kullanımı

Bor, seramik sanayinde genellikle sır ve fritlerde kullanılmaktadır. Sırlarda kullanılan bor oksit oranı ağırlıkça % 8-24 arasındadır. Sırlarda bor oksitin temel fonksiyonu, esas itibariyle cam ve malzeme arasında ısıl uyum sağlamak ve ısıl genişleme kat sayısını düzenlemektir. Sırlara, bor ilavesinin diğer bir sebebi de, ergimenin ilk safhalarında cam oluşumunu sağlamaktır. Ayrıca boratlar, sırçaların refrakter endeksini artırarak görünümünü de güzelleştirmektedir. Sır'a bor ilavesi mekanik gücü ve çizilme direncini artırmaktadır. Bor, kimyasalların ve suyun etkilerine karşı da direnci artırır. Bir diğer taraftan borlar renklendiricilerin katılımına zemin oluştururlar.

% 20'ye kadar kullanılabilen bor oksit, emayelerin akışkanlığını ve doyunlaşma ısısını azaltır. Emayeye katılan hammaddelerin özellikle % 17-32'si bor oksit olup, sulu boraks tercih edilir. Seramiği çizilmeye karşı dayanıklı yapan bor, % 3-24 oranlarında kolemanit halinde sırlara katılır [19]. Metalle kaplanan emaye onun paslanmasını önler. Çelik, bakır, alüminyum, altın ve gümüş emaye ile kaplanabilir ve bu emaye asite karşı dayanıklılığı artırır. Mutfak aletlerinin çoğu emaye kaplamadır. Banyo, kimya sanayi teçhizatı, su tankları, silahlar v.b. de kaplanır.

1.6.4. Tarımda kullanımı

Bitki büyümesinde önemli bir yeri olan borun mutlak gerekliliği yaklaşık 82 yıl önce belirlenmesine rağmen bitkiler üzerindeki etkisi tam olarak anlaşılamamıştır.

Bor, hücre bölünmesi-gelişimi, şeker geçişini ve fotosentez metabolizmasını düzenler. Bor olmadan da bitkiler büyüyebilir ve yaprak açabilir. Fakat meyve veya tohum da kayıplar söz konusu olacaktır.

Sebzelerin beslenmesi ve gelişmesi üzerine yapılan araştırmalar sonucunda; borun, sebzelerin büyümesini ve kalitesini iyileştirdiği görülmüş. Sebzelere bor etkisi ile büyüme noktalarının başlangıç ve gelişiminde, hücre içinde şeker ve nişasta iletiminde,

besleyici maddelerin bitki içerisinde dolaşımında, büyümei etkileyen hormonların oluşumunda, kök, çiçek ve tomurcuk gelişiminde artış olduğu gözlenmektedir.

Bor, meyve ağaçlarında çiçek açma, meyve verme ve meyve kalitesi açısından önemli bir mikro besleyicidir. Uygun miktarda bor içeren bir meyve ağacında, çiçek açma ve meyve kapasitesinde artış, meyve içinde ve kabuğundaki yaralanma ve çürümelerde azalış, şeker ve besleyicilerin iletiminde hızlanma olduğu gözlenmektedir.

Bitkiler gelişimlerini tamamlayabilmeleri için oldukça az oranda bor ihtiyacı duyarlar. Bu nedenle uygulamada oldukça dikkatli davranılmalı ve toprak analizi ve gerekli incelemeler yapılmadan bitkiye bor ilave edilmemelidir. Aynı türün çeşitleri arasında bor kapsam ve toleranslarında önemli farklılıklar olduğu gibi bitki türleri arasında da farklılıklar bulunabilmektedir. Örneğin şeker pancarında hektar başına 3 kg bor uygulanırken, bu miktar buğday için 1 kg olabilmektedir.

Bor, toprak bünyesine borik asit, boraks gibi farklı bor kaynakları kullanılarak uygulanabilmektedir. Üzerinde durulması gereken nokta, uygulanacak bor kaynağının toprağın pH değerini bozmayacak şekilde nötr ve uygulama sırasında kolay çözünebilir olmasıdır [19].

1.6.5. Temizleme ve beyazlatma sanayinde kullanımı

Sabun ve deterjanlara mikrop öldürücü, su yumuşatıcı etkisiyle % 10 boraks dekahidrat, beyazlatıcı etkisini artırmak için de toz deterjanlara % 10-20 oranında sodyum perborat katılmaktadır.

1.6.6. Alev geciktiriciler

Boratlar, ahşap, selülozik yalıtım, PVC ve tekstil gibi malzemelerde alev geciktirici olarak kullanılmaktadır. Bor, yanan malzemenin üzerini kaplayarak oksijenle temasını kesecek şekilde yanmayı bastırır. Çinko borat, plastik malzemelerde kullanılırken borik asit, boraks dekahidrat ve boraks pentahidrat gibi çözünebilir boratlar ise selülozik malzemelerde (tahta, kontraplak, ağaç fiber, kağıt ve pamuk gibi doğal fiberler) kullanılmaktadır. Selülozik yalıtımda, borik asit ve boraks pentahidrat kullanılmaktadır. Bu malzemeler, mantar ve diğer mikroorganizmaların gelişimini engellemek, alev

almaya karşı malzemenin direncini yükseltmek ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla kullanılmaktadır.

Çinko borat, bor fosfatlar, baryum metaborat ve amonyum fluoborat PVC’de yanmayı önleyici olarak kullanılan bor bileşiklerinin başında gelmektedirler. PVC yanarken HCl (hidrojen klorür) açığa çıkmaktadır. Alev geciktirici olarak çinko borat katılırsa, bu gaz uçucu olmayan çinko ve bor bileşikleri ile reaksiyona girerek zararlı gazların açığa çıkmasını engellemektedir.

Boraks ve borik asit, tekstil alanında yararlı alev geciktiriciler olmakla birlikte, suda çözünebildikleri için üründen yıkanarak atılma sorunu doğurabilmektedir.

Mantar ve böceklerden ahşabın uzun süreli korunabilmesinde, disodyum oktaborat tetrahidrat başarılı bir şekilde kullanılabilir. Bu malzeme, özel bir önlem gerektirmeden, sprey, boyama veya basınç yoluyla çok kolay uygulanabilmektedir.

1.6.7. Cam sanayide kullanımı

Cam sektörü borun en fazla kullanıldığı alandır. Bor, erimiş haldeki cam ara mamulüne ilave edildiğinde onun akışkanlığını artırmakta, oluşan ürünün yüzey sertliğini ve dayanıklılığını artırmaktadır.

Bor, tekstil ve izolasyon tipi cam elyaflarında, Borosilikat cam, sıvı kristal göstergelerinde, özel fırın kaplarında, laboratuvar malzemelerinde, araba far ve sinyal camlarında, cam yününde, LCD (Liquid Crystal Display) ekranlar ve CRT cam ürünlerinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra uzay sanayinde, elektronik endüstrisinde ve nükleer reaktörlerde de borlu bazı özel camlar tercih edilmektedir.

1.6.8. Metalürji alanında kullanımı

Bor bileşikleri, yüksek sıcaklıklarda düzgün, yapışkan, koruyucu ve çapaksız sıvı oluşturma özellikleriyle demir dışı metal sanayinde koruyucu cüruf oluşturu ve ergitmeyi hızlandırıcı madde olarak kullanılmaktadır.

Flakslama uygulamalarında bor, bakır alaşımlarının eritilmesinde ve altın analizlerinde, çeliğin lehim kaynağı yapımı ve gaz lehimlemede kullanılmaktadır.

Bor ilavesi çeliğin mukavemetini ve sertliğini artırmaktadır. Borlu çeliklerin sertleşebilme yetenekleri daha yüksektir. Ayrıca bor paslanmaz çeliklere de ilave edilmektedir.

Ferrobör; dökme demir, çelik, sürekli mıknatıslar ve amorf metallerin üretiminde kullanılır. Dünya da ferrobör üretiminin % 50'den fazlası çelik endüstrisinde, % 10'luk bir bölümü ise Nd-Fe-B sürekli mıknatıslarının üretiminde kullanılmaktadır.

Bor bileşiklerinin kullanıldığı diğer bir uygulama ise borlamadır. Borlama ile çelik yüzeylerinin sertliği artırılmaktadır. Borlanmış çelikler, yüksek korozyon ve aşınma direnciyle hidrolik aletlerin ve bazı petrol-kuyusu delme matkaplarının yüzeylerinin cilalanması gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca, borlama işleminden geçirilmiş malzemeler, otomotiv endüstrisinde sürtünme katsayısını azaltmakta ve hareketli aksamaları korumaktadır.

Bor nitrür, yüzey kaplamada sürtünme katsayısını düşürdüğü için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaplama işlemi, yüksek vakumlu ortamda ve uygun sıcaklıkta h-BN'ün buharlaştırılarak c-BN film elde edilmesiyle gerçekleşmektedir.

Bor kimyasalları temizleyici ve tampon olarak elektro kaplama uygulamalarında kullanılmaktadır. Borik asit ve flouoroboratlar, yataklardaki gözenek ve çukurların azaltılması için çok az miktarda kullanılırken, flouoroborik asit, kalay-kaplama tellerinin temizlenmesinde (pickling) % 10 civarında kullanılmaktadır.

1.6.9. Bor fiberleri

Bor fiberleri, spor aletleri (golf, kayak, bisikletler) uzay ve hava araçları gibi birçok alanda kullanılmaktadırlar. Bor fiber kompozitleri, bor fiberleri ile güçlendirilmiş polimer reçinelerden oluşmaktadır. Bu kompozitler, hava ve uzay araçlarının üretiminde kullanılan ilk ileri kompozit malzemedir. Fakat yüksek maliyetleri bor fiberlerinin kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır [19].

1.6.10. Nükleer uygulamalarda kullanımı

Borlu çelikler, bor karbürler ve titanbor alaşımları atom reaktörlerinde kullanılmaktadır. Nötron absorbanı olarak paslanmaz borlu çelik tercih edilmektedir. Yaklaşık her bir bor atomu bir nötron absorbe etmektedir.

Atom reaktörlerinin kontrol sistemleri ile soğutma havuzlarında ve reaktörün alarm ile kapatılmasında bor (B_{10}) kullanılır. Nükleer atıkların depolanmasında da kolemanit kullanılmaktadır.

1.6.11. Enerji depolamada kullanımı

Termal depolama pillerindeki, sodyum sülfat ve su ile yaklaşık % 3 ağırlıktaki boraks dekahidratın kimyasal karışımı gündüz güneş enerjisini depolar. Depolanan enerji gece ısınma amacıyla kullanılabilir. Binalarda tavan malzemesine konulduğunda güneş ışınlarını emer ve evlerin ısınmasını sağlar.

Bor, demir ve nadir toprak elementleri kombinasyonu (METGLAS) % 70 enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu güçlü manyetik ürün; bilgisayar disk sürücülerini, otomobillerde direk akım- motorları, ev eşyaları ile portatif güç aletlerinde kullanılmaktadır.

Otomobil hava yastıkları, antifriz bor hava yastıklarının hemen şişmesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Çarpma anında, bor ile potasyum nitrat toz karışımı elektronik sensör ile harekete geçirilir. Sistemin harekete geçirilmesi ve hava yastıklarının harekete geçirilmesi için geçen toplam zaman 40 milisaniyedir. Ayrıca otomobillerde antifriz olarak ve hidrolik sistemlerde de kullanılmaktadır.

1.6.12. Yakıtta kullanımı

Son günlerde sodyum borohidritin'in kullanıldığı, sodyum borohidrattan enerji üreten hücre yakıtıyla ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Sodyum borohidratın kimyasal bağlarında hidrojen mevcut olup, katalist hidrojeni açığa çıkarmakta veya elektrik üretmektedir. Bu üretim de temel prensip ise su ile boraksın reaksiyonudur. Bu reaksiyondan üretilen hidrojen direk içten yanmalı motorlara beslenebilir veya hücre yakıtlarında kullanılabilirler.

1.6.13. Sağlık alanında kullanımı

Bor, insan vücudu tarafından az da olsa ihtiyaç duyulan, hücrelerde sentezlenemediğinden dolayı besinlerle dışarıdan alınması gereken önemli besleyicilerden biridir. 1981 yılına kadar borun insanlar üzerinde bir etkisinin olmadığı düşünülse de bu yıldan sonra yapılan çalışmalarla borun, birçok tedavi için vazgeçilmez

bir element olduğu ve insan gelişiminde düşünölenin tam aksine etkin olduğu belirlendi. Metabolizmadaki bor, magnezyum, fosfor ve kalsiyum dengesini ayarlayarak kemiklerin oluşumuna, kas ve beyin fonksiyonlarının gelişimine yardım eder.

Alerjik hastalıklarda, osteoporoz tedavilerinde, psikiyatride, kemik gelişiminde ve menopoz tedavisinde bor aktif olarak kullanılmaktadır. Ayrıca kesin bir tedavi olmamakla birlikte Bor Nötron Yakalama Tedavisi (BNCT) ile sağlıklı hücreleri yok etmeden kanserli hücreleri hedef alan bor elementi, kanser tedavisinde yeni bir umut olabilir.

1.6.14. Atık temizlemede kullanımı

Sodyum borohidrat, atık sular içerisindeki kurşun, cıva ve gümüş gibi ağır metallerin sulardan temizlenmesinde yaygın olarak tercih edilen bileşiktir.

1.6.15. İnşaat-çimento sektöründe kullanımı

Mukavemet artırıcı ve izolasyon amaçlı daha sağlam, hafif ve depreme-ısıya dayanıklı binaların yapılmasında, yalıtımda kullanılmaktadır.

1.6.16. Ahşap korumada kullanımı

Bakterilere ve çürümeye karşı koruyucu ve alev geciktirici olarak kullanılmaktadır. % 30'luk sodyum oktaborat çözeltisi uygulanan tahta malzeme yavaş yavaş kurutulursa bozulmadan ve küllenmeden uzun süre kullanılabilir.

1.6.17. Diğer kullanım alanları

Polimer sanayinde, silisyum üretiminde esterleme ve alkilleme işlemlerinde bor triklorür, etil benzen üretiminde ise bor trifluorür katalizör olarak kullanılmaktadır.

Bor nitrür ve bor karbür bileşikleri, döküm çepelerinde aşınmaya ve yüksek sıcaklığa dayanıklı malzeme püskürtme memelerinde kullanılmaktadır.

Boraks, korozyonu önlemek amacıyla araçların soğutma sistemlerinde, antifriz içerisinde katkı maddesi olarak kullanılır. Ayrıca boru ve tel çekmede akıcılığı sağlayıcı madde, tekstil sanayinde, nişastalı yapıştırıcıların viskozitelerinin ayarlanmasında, proteinlerin

ayrıştırılmasında yardımcı madde ve dericilikte kireç çöktürücü madde olarak boraks kullanılmaktadır.

Gelişen teknolojiler, bor kullanımını ve bağımlılığını artırmakta, borun stratejik mineral olma özelliği giderek daha da belirginleşmektedir. Dünyada üretilen bor minerallerinin % 10'a yakın bir bölümü doğrudan mineral olarak, geriye kalan kısmı rafine ürünler elde etmek için tüketilmektedir.



BÖLÜM 2

ÇELİKLER VE AISI 4140 ÇELİĞİ

2.1. Çelik

Demir (Fe) ve karbon (C)'dan oluşan alaşımlara çelik denir. Çeliğe farklı oranlarda karbon ve alaşım elementleri eklenerek farklı özellikler kazandırılabilir. Bunun yanı sıra çeliklere çeşitli işlemler uygulanarak içyapısında değişiklikler oluşturulabilir ve böylece farklı kullanım alanlarına hizmet edilebilir.

Çelikler özelliklerine göre farklı kategorilerde sınıflandırılır. Fakat genel olarak şu şekilde sınıflandırılabilir:

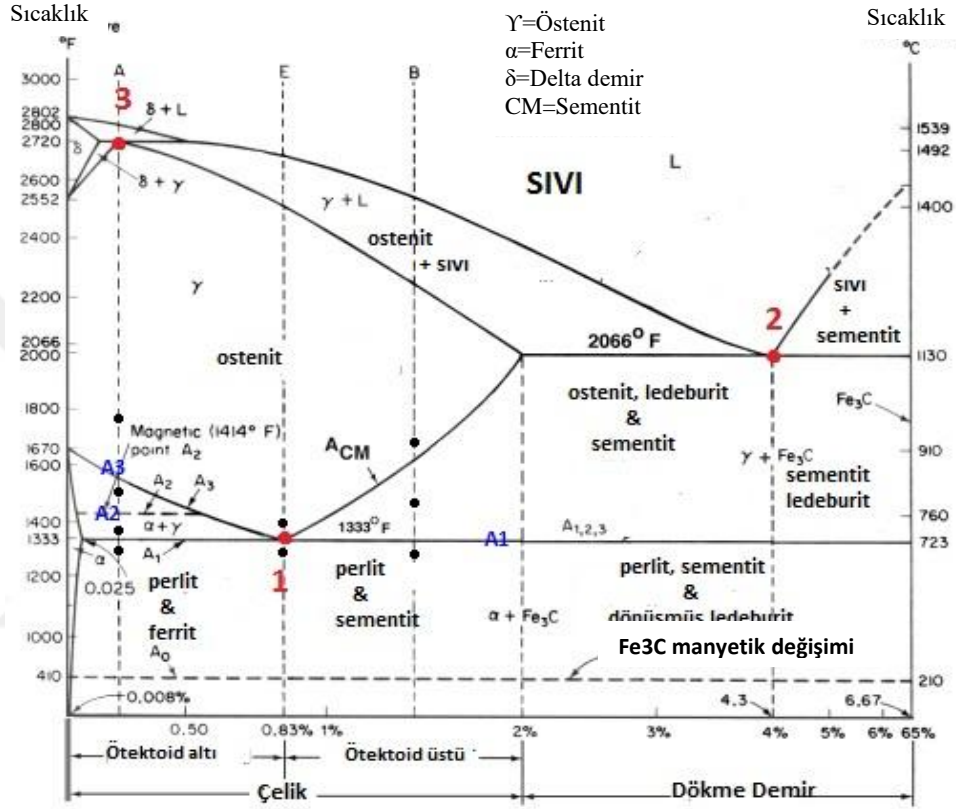
- Kalitesiz yumuşak çelikler
- Kolay kaynak çelikleri
- Yapı çelikleri
- İmalat çelikleri
- İslah çelikleri
- Paslanmaz çelikler
- Takım çelikleri
- Kullanım yerine göre çelikler

Çeliklerin genel özelliklerini maddeler halinde özetlersek;

- Çeliklerin büyük kısmı ısıtılma işlemine karşı duyarlıdır. Kimyasal bileşimin yanı sıra uygulanan ısıtılma işlemler sonucunda istenilen yüksek sıcaklığa dayanım, mekanik, fiziksel ve elektriksel özelliklere tam olarak ulaşılabilir.
- Çelikler yapılarının gerektirdiği sıcaklıklara kadar ısıtıldıklarında haddeleme, presleme ve dövme gibi şekillenebilme özelliğine sahiptirler. Ayrıca kimyasal bileşim ve içyapı olarak uygun olan çelikler haddeleme, presleme gibi yöntemlerle soğuk olarak da şekillendirilebilir.
- İstenilen şekil ve yüzey düzgünlüğü, talaş kaldırıcı tezgâhlarda işlenebilir.
- Kimyasal bileşim olarak uygun olan çelikler kaynak işlemi yapılarak birleştirilebilir.

- Çeliklerin büyük bir bölümü çeşitli yöntemlerle metal ve plastik maddeler kaplamaya, emaye yapılmaya, boyanmaya elverişlidir.

2.2. Demir-Karbon Denge Diyagramı



Şekil 2.1. Demir- Karbon denge diyagramı

Malzemenin farklı sıcaklık, basınç ve bileşimdeki mikroyapısını gösteren haritalara faz diyagramları denir [23]. Bu üç özelliği tek bir faz diyagramında göstermek zor ve çok kullanışlı değildir. Bu sebeple faz diyagramları genellikle basınç-bileşim, basınç-sıcaklık ve sıcaklık-bileşim olarak ayrı ayrı incelenir. Faz diyagramları tek bileşenli maddeler, ikili ve üçlü alaşım sistemleri için çizilebilirler. İkili ve üçlü sistemlerde genellikle katı-sıvı geçişlerinde basıncın etkisi ihmal edilir.

Fe-C faz diyagramında % 2'den az C içeren bileşimler çelik, % 2'den daha fazla C içeren bileşimler dökme demir olarak isimlendirilir. Denge diyagramındaki fazlar detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

- **Ferrit (α -demir):** Saf demirin oda sıcaklığındaki HMK (Hacim Merkezli Kübik) yapısıdır ve çok az miktarda karbon çözündürür. Oda sıcaklığında % 0.008 çözündürürken 723 °C (A1) sıcaklıkta % 0.025 çözündürür. Çok az karbon bulundurduğundan nerdeyse saf demir gibi manyetik davranış gösterir. Ferritin çekme dayanımı 270 MPA, kopma uzaması % 40 ve sertliği 150 BHN civarındadır. Kafes parametresi 2.86 Å, atomik dolgu faktörü ise (ADF) 0.68,'dur. Karbon oranı az olduğu için mekanik özellikleri (sertlik ve mukavemet) düşük, sünekliliği ve işlenebilirliği yüksektir.

- **Östenit (γ - demir):** 910-1401 °C arasında kararlı yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahiptir. Kafes parametresi 3.57 Å, atomik dolgu faktörü ise (ADF) 0.74'tür. Yüksek sertliğe ve tokluğa sahiptir. Oda sıcaklığında kararsızdır. Fakat bazı alaşım elementleri ilave edildiğinde kararlı hale getirilebilen bir fazdır.

- **Perlit (α +Fe₃C):** 723 °C sıcaklıkta meydana gelen ötektoid bileşime sahip çeliğin östenit bölgesinden yavaş soğutulmasıyla oluşur. Mikroyapısı, % 88 ferrit üzerine % 12 sementit lamellerinin dizilmesiyle oluşur. Perlit, uygun ısıl işlem uygulandığında bütün çeliklerde oluşturulabilir. Bir çeliğin oda sıcaklığındaki mikro yapısının % 100 perlit olması için % 0.8 C içermesi gerekir. Sertliği 20 HRC, 90-100 HRB veya 250-300 HB civarındadır.

- **Sementit (Fe₃C):** İntermetalik demir karbürü olan sementit, sert ve kırılgan özelliklere sahip ortorombik kristal yapıdadır. 215 °C'nin altında ferromanyetik özellik gösterir. Sementit, yüksek basma dayanımı ve düşük çekme dayanımı (35 MPa) olan bir ara yer bileşiğidir. Bir çok ticari çeliğin sertleştirilmesinde önemli bir yere sahiptir.

- **Ledeburit:** Sementit ve östenit fazlarının oluşturduğu ötektik bileşimdir. Sıcaklık A1 çizgisinin altına düşürüldüğünde östenit yapı perlite dönüşür ve oluşan yapı perlit+sementit'tir. Bu yapı % 4.3 C içeren dökme demirlerin yapısında bulunur.

Ledeburit fazı oldukça mukavemetli ve serttir. Faz diyagramları çok yavaş soğuma koşullarında çizilmiştir. Soğuma hızı arttırıldığında martenzit ve beynit gibi faz diyagramında görünmeyen kararsız fazlar ortaya çıkar.

- **Martenzit:** Östenitin hızlı bir şekilde soğutulmasıyla oluşur ve karbonca aşırı doymuştur. Kristal yapısı hacim merkezli tetragonaldir. % 0.6 C'dan daha fazla C içeriyorsa hacim merkezli kübik (HMK) yapıda bulunur. Martenzit fazının mukavemeti oldukça yüksek, sert ve kırılgandır.

- **Beynit:** Sementit ve demir fazlarının oluşturduğu iki fazlı bir yapıdır. İzotermal bir ısıl işlemde östenitin dönüşümü ile oluşur. Beynit, üst beynit ve alt beynit olmak üzere iki farklı morfolojik yapıya sahiptir.

Şekil 2.1. de 1, 2 ve 3 noktaları dönüşümlerin meydana geldiği önemli noktalardır. Bunlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- **Ötektoid nokta:** 723 °C (A1) ve % 0.8 C'nun kesiştiği noktadır. Östenit bölgesinden soğumaya başlayan çelik bu noktaya geldiğinde tek fazlı (γ) yapıdan ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) çift faza dönüşür. Bu noktadan itibaren östenit, yüksek miktarda C içeren sementit ve ferrit fazına dönüşür. Bu dönüşüm sırasında ferrit ve sementit lamelli bir yapı oluşturur. Bu yapı perlit yapısıdır. Dönüşüm izotermal olarak gerçekleşir ve katı fazdan katı faza dönüşüm söz konusudur. Diyagramda yer alan 1 numaralı nokta Ötektoid noktadır.

- **Ötektik nokta:** 1130 °C ve % 4.3 C içeren dökme demirin kesiştiği noktadadır. Burada sıvı faz katılarak iki farklı katı fazdan ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$) oluşan ledeburite dönüşür. Dönüşüm izotermaldir ve sıvı fazdan katı faza dönüşüm söz konusudur. Bu nokta diyagramda 2 numaralı noktadır.

- **Peritektik nokta:** 1492 °C ve % 0.25 C içeren çeliğin kesiştiği noktadadır. Peritektik nokta da üç faz ($\delta + \gamma + \text{sıvı}$) dengede bulunur. Sıvı faz önceden meydana gelen bir katı fazla reaksiyona girerek yeni bir katı faz oluştururlar. Yani sıvı faz + δ demir, östenite dönüşür. İzotermal bir dönüşüm söz konusudur. Diyagramda 3 numaralı nokta peritektik noktadır.

- **A1 sıcaklığı:** Faz diyagramında 723 °C boyunca uzanan çizgidir. Diğer adıyla ötektoid sıcaklık olan bu çizgi birçok faz dönüşümü için önemli bir sıcaklıktır. Demir, bu sıcaklığın üstünde yüzey merkezli kübik (YMK) yapıda bulunurken, bu sıcaklığın altında hacim merkezli kübik (HMK) yapıda bulunur.

- **A2 sıcaklığı:** 760 °C de bulunur. Demir bu sıcaklığın altında manyetik, üzerinde ise paramanyetiktir.

- **A3 sıcaklığı:** 910 °C'den ötektoid noktasına inen eğridir. Östenit bölgesini sınırlandırır. Bu eğrinin altındaki östenit fazı, östenit +ferrit'e dönüşür.

- **A_{CM} sıcaklığı:** Ötektoid üstü çeliklerde tam östenit alanına geçiş sıcaklığıdır.

2.3. Kimyasal Bileşimlerine Göre Çeliklerin Sınıflandırılması

Karbon oranı % 0.8'den az olanlara ötektoid altı çelikler, % 0.8 olanlara ötektoid çelikleri, % 0.8'den fazla olanlara ötektoid üstü çelikler denir. Çelikler genel olarak alaşımlı ve alaşımsız çelikler olmak üzere sınıflandırılır. Alaşım elementlerinin toplamı % 5'ten az olanlara az alaşımlı çelikler, % 5'ten fazla olan çeliklere de yüksek alaşımlı çelikler denir.

2.3.1. Karbon oranına göre çelik (alaşımsız çelik)

2.3.1.1. Sade karbonlu çelik

Bu çelikler % 0.20 oranına kadar karbon içermektedirler ve dünya çelik üretiminin en büyük kısmını teşkil ederler. Yassı mamul ve inşaat sanayinde ve de konstrüksiyonda kullanılan çubuk, profil v.b. uygulamalarda kullanım alanına sahiptir. Teknolojide sementasyon ve nitrürasyona tabi tutularak, yüzeyi sert ve iç kısmı tok olan çeliklerde bu grupta yer almaktadırlar. Az karbonlu çeliklerin kimyasal olarak bileşim alanları Tablo 2.1.' de verilmektedir.

Tablo 2.1. Az karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları [24]

Element	Ağırlıkça (%)
Karbon	0.00-0.20
Mangan	0.30-0.60
Silisyum	0.10-0.20
Fosfor	Max. 0.04
Kükürt	Max. 0.05

2.3.1.2. Orta karbonlu çelik

Bu çelikler % 0.20-0.60 arasında karbon bulunduran çeliklerdir. Karbon oranına bağlı olarak orta derecede mekanik özelliklere sahiptirler. En büyük özellikleri, ısı işleme tabi tutulduklarında yeteri derecede sertleştirilebilmeleridir. Bu avantajından dolayı orta karbonlu çeliklerin kullanım sahaları önemlidir. Özellikle makine imalat sanayinin tercih ettiği çeliklerin başında gelmektedirler. Düşük karbonlu çeliklere göre şekil alabilme, işlenebilme ve kaynak kabiliyetleri daha düşüktür. Kaynak esnasında açığa çıkan kontrolsüz ısı etkiler çeliğin yapısal değişiminin de kontrolsüz olmasına neden olur. Bunun sonucunda malzemelerde hatalar meydana gelebilir. Bu sebepten dolayı alaşım elementi ihtiva eden orta karbonlu çeliklerin kaynak işlemlerinde ayrı bir itina göstermek gerekir. Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları Tablo 2.2.' de verilmektedir.

Tablo 2.2. Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları [25]

Element	Ağırlıkça (%)
Karbon	0.20-0.50
Mangan	0.60-0.90
Silisyum	0.15-0.23
Fosfor	Max. 0.04
Kükürt	Max. 0.05

2.3.1.3. Yüksek karbonlu çelik

% 0.60'dan fazla karbon içeren çeliklerdir. Normalde yüksek mukavemetli ve sünekliliği azdır. Fakat ısı işlemlerle sertleştirildiklerinde yüksek sertlik kazanırlar. Bu bakımdan aşınmaya dayanıklı ve kesici özelliğe sahiptirler. Düşük ve orta karbonlu çeliklere göre işlenme, şekil alabilme ve kaynak kabiliyetleri daha düşüktür. Bu gruptaki çelikler daha çok takım üretiminde kullanılır. Yüksek karbonlu çeliklerin bileşim aralıkları Tablo 2.3'de verilmektedir.

Tablo 2.3. Yüksek karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları [24]

Element	Ağırlıkça (%)
Karbon	0.55-0.90
Mangan	0.70-1.00
Silisyum	0.15-0.30
Fosfor	Max. 0.04
Kükürt	Max. 0.05

Yüksek karbonlu çeliklerin bileşiminde bulunan karbon miktarının sınırı, demir-karbon denge diyagramı gereğince % 2'ye kadar çıkabilirse de, uygulama da bu değer % 1.2-1.4 ile sınırlıdır. Düşük ve orta karbonlu çeliklere göre yüksek karbonlu çelikler daha kolay su alabilirler. Oluşan martenzitik yapının sertliği de daha fazladır.

2.3.2. Alaşımli çelik

Karbonlu çeliklerden normal olarak sağlanamayan kendine has özellikleri kazanmak için, bir veya birden fazla alaşım elementi katmak suretiyle yapılan çelikler alaşımli çeliklerdir. Alaşımli çeliklerde karbon çelikleri için belirtilen değerlerin üzerinde manganez, silisyum, bakır veya daha fazla alaşım elementleri belirlenmiş aralıklarda bulunur. Yüksek alaşımli çelikler buldukları temel alaşım elementi veya elementlerine göre sınıflandırılırlar. Nikel çelikleri, krom çelikleri, krom-vanadyum çelikleri, molibden çelikleri örnek gösterilebilir.

Çeliklere alaşım elementi ilavesinin sağlayacağı yararlar şöyle sıralanabilir:

- Az karbonlu çeliklerde tüm kesit boyunca martenzitik bir yapı oluşması için çeliklerin çok hızlı soğutulması gerekmektedir. Fakat bu durum çarpılma ve çatlama riskini arttırmaktadır. Oysaki alaşımli çeliklerde, yağda ve havada yapılan soğutmalarla bile kolaylıkla martensitik yapı elde edilebilmektedir.
- Bazı çeliklere alaşımlama yapılarak darbe dayanımları önemli ölçüde yükseltilebilir.
- Sade karbonlu çeliklerin korozyon direnci oldukça zayıftır. Alaşımlama ile çeliklerde korozyon dayanımı büyük oranda arttırılır.

- Alaşımli çeliklerde yüksek gerilme ve süneklik değerleri korunur. Temperlemede daha yüksek temperleme sıcaklıklarının kullanılmasına olanak sağlanır.
- Alaşımli çelikler, düşük ve yüksek sıcaklıklarda çalışma durumlarında, büyük ölçüde mekanik özelliklerini korurlar.
- Alaşımli çeliklerin yorulma davranışı ve aşınma direnci, bazı alaşım elemanlarının katkısıyla büyük oranda artış gösterir [26].

Alaşımli çelikler:

- % 2 – 5 oranlarında alaşım elementi içeren az alaşımli çelikler
- % 5'den daha fazla alaşım elementi içeren yüksek alaşımli çelikler
- Mikroalaşımli çelikler

olarak sınıflandırılırlar.

2.3.2.1. Az alaşımli çelik

Alaşım elementi veya elementlerinin toplamı % 5'den az olan, genellikle su verilip temperlendikten sonra kullanılan çeliklerdir. Tokluk, mukavemet ve korozyon direnci gibi özelliklerin göz önüne alındığı servis koşulları için daha ucuz olan alaşımli çeliklere tercih edilirler. Alaşım çeliklerine kıyasla daha yüksek sertleşme kabiliyetine ve ısı işlem sırasında daha düşük çatlama ve çarpılma eğilimine sahiptirler. Az alaşımli çeliklerin bileşiminde ana alaşım elementi olarak manganez, krom, nikel, volfram (tungsten) ve molibden bulunur. Bu çeliklere kobalt, bor, vanadyum, alüminyum, bakır, kurşun, titanyum ve niyobyum gibi alaşım elementleri de ilave edilebilir.

2.3.2.2. Yüksek alaşımli çelikler

Alaşım elementi veya elementlerinin toplamı % 5'den yüksek olan çeliklerdir. Paslanmaz çelikler, manyetik çelikler ve özel amaçlı takım çelikleri bu gruba giren en önemli çelik türleridir.

2.3.2.3. Mikroalaşımli çelikler

Az karbonlu, bileşiminde düşük oranlarda alaşım elementi bulunan ve genellikle yassı mamul üretiminde kullanılan çelikler girmektedir. Yüksek mukavemetli az alaşımli

(HSLA) çelikler, çift fazlı (DF) çelikler, ara yer atomsuz (IF) çelikler mikroalaşımli çeliklere örnek olarak verilebilir.

2.4. Alaşım Elementlerinin Etkisi

Çeliklere bir veya birden fazla katılarak onlara belirli özellikler kazandıran ya da zayıflatan bileşenlere alaşım elementleri denir. Alaşım elementleri diğer metallere kıyasla daha çok çeliklerin yapısında değişikliklere sebep olur.

2.4.1. Karbon

Çelik için en temel alaşım elementidir. Karbon miktarı arttıkça sertlik ve dayanım da önemli ölçüde artar. Ancak % 0.8 karbona kadar akma sınırı değeri ve çekme gerilmesi artar. Bu değerden sonra kırılma artar. Isıl işlem sonunda sertlik, kalıntı östenit nedeniyle daha fazla artmaz. Çeliğin alabileceği maksimum sertlik (67 HRC) karbon miktarı % 0.6 olduğunda elde edilir. Çeliklerde karbon miktarı dövülebilirlik, süneklilik, derin çekilebilirlik ve kaynak kabiliyeti gibi özellikleri olumsuz etkilemektedir. Yüksek karbonlu çeliklerin ısıl işleminde çatlama riski de fazladır.

2.4.2. Mangan

Yapıya genellikle cevher halindeyken girer. Mekanik özellikleri iyileştirmesi sebebiyle ayrıca da ilave edilir. Temel alaşım elementi olarak da kullanılabilir. Genel olarak sünekliliği azaltmakla birlikte, çeliğin dayanımını artırır. % 3 Mn miktarına kadar, her % 1 Mn için çekme dayanımı yaklaşık 100 MPa kadar artar, % 3-8 arası artış azalır, % 8 den itibaren düşüş görülür. Çeliğin sertleşebilirliğini ve dövülebilirliğini iyileştirici özelliktedir. Kaynak kabiliyetini olumsuz yönde etkilemez. Karbon oranının artmasıyla manganın iyi yöndeki etkisi artar. Ayrıca çeliğin yüzey kalitesini de iyileştirir.

2.4.3. Silisyum

Çelik üretimi sırasında oksijen giderici olarak kullanılır. Döküm çeliklerde, döküme akıcılık kazandırmak için ilave edilebilir. Ferrit içerisinde çözünebilirlik özelliğine sahip olduğundan malzemenin tokluk ve sünekliliğini düşürmeden, sertliği ve dayanımını artırır. Yüksek silis içeren çeliklerin ısı dayanımı da yüksektir. Aşınma dayanımını,

sertleşebilirliği ve elastikiyeti yükseltmesine karşın yüzey kalitesini olumsuz yönde etkiler. Çelik içerisindeki silisyum miktarı arttıkça çeliğin tane büyüklüğü de artar.

2.4.4. Kükürt

Otomat çeliklerinde talaşlı şekillendirmeyi iyileştirmek için yüksek oranda kükürt kullanılır. Bunun haricinde istenmeyen bir elementtir ve sürekli azaltılmaya çalışılır. Kükürt miktarı yükseldikçe, şekillendirmeye boyuna doğrultuda etkilenme az iken, dik doğrultuda darbe dayanımı ve süneklik düşer. Mangane ile dengelenmediğinde sıcaklıkta kırılganlık yapar, kaynak edilebilirliği ve sertleşebilirliği kötüleşir.

2.4.5. Fosfor

Varlığı ile malzeme tokluğunu düşüren, zararlı etkiye sahip bir elementtir. Çeliğin dayanımını ve sertliğini artırıcı özelliği olmasına rağmen süneklik ve darbe dayanımını düşürür. Bu etki yüksek karbonlu çeliklerde daha nettir. Çeliğin korozyon dayanımını iyileştirmesine karşın mümkün olduğunca düşük olmasına dikkat edilir. Fosforun kükürtle birlikte azlığı malzeme kalitesinde birinci kriterdir.

2.4.6. Krom

Çeliklere en fazla ilave edilen elementtir. Çelikte, oksidasyona ve korozyona karşı dayanımı, sertleşebilirliği ve aşınma direncini artırır. Çeliğe ilave edilen krom $Cr_{23}C_6$ ve Cr_7C_3 gibi sert karbürler oluşturarak sertliği direkt olarak artırırken, dönüşüm hızlarını da yavaşlatarak sertlik derinliğini de aynı oranda artırır. Malzemeye % 25'e varan değerlerde ilave edilmesi halinde malzeme yüzeyinde oksit tabakası oluşturarak paslanmaya karşı direnç oluşturur ve malzemeye parlak bir görüntü kazandırır. Çekme dayanımını ve ısıya dayanımı da artırır özelliğe sahiptir. Bazı alaşımlarda meneviş kırılganlığına sebep olabilir ya da sünekliği düşürebilir. Bu etkileri azaltmak için daha çok Ni ve Mo ile birlikte kullanılır.

2.4.7. Nikel

Nikel %5'e varan oranlarda, alaşımlı çeliklerde geniş bir biçimde kullanılır. Nikel malzemenin mukavemetini ve tokluğunu artırır. Özellikle paslanmaz çeliklerde daha geniş yer alır. Nikel aynı zamanda tane küçültme etkisine de sahiptir. Alaşım elemanı

olarak nikelin tek başına kullanımını son yıllarda azalmış, Ni-Cr alaşımı başta olmak üzere Ni-Mo ya da Ni-Cr-Mo alaşımları yaygınlaşmıştır. Sıcağa ve tufallaşmaya karşı iyileştirici özelliğe sahip olmasının yanı sıra, krom ile birlikte kullanılarak sertleşmeyi, sünekliği ve yorulma direncini artırır.

2.4.8. Molibden

Molibden düşük nikel ve düşük krom içeren çeliklerde temper gevrekliği eğilimini gidermek için kullanılır. % 0.3 civarında molibden ilavesi bunu sağlar. Molibden ilavesi yapılan nikel ve krom çeliklerinin temper sonrası darbe dayanımları da önemli ölçüde yükselir. Aynı zamanda akma ve çekme dayanımını artırır.

2.4.9. Vanadyum

Nikel gibi vanadyum da çelikler için önemli bir tane küçültücüdür. % 0.1 gibi bir oranda kullanılması bile, sertleştirme prosesi esnasında tane irileşmesini önemli ölçüde engeller. Vanadyum sertlik derinliğini artırmakla beraber sıcaklık dayanımını da artırır. Özellikle kesmeye çalışan parçalarda, darbe dayanımının artmasını sağlayarak kesici kenarların formunun uzun süre muhafaza edilmesinde etkilidir.

2.4.10. Wolfram

Wolfram; çeliğin dayanımını artıran bir alaşım elementidir. Takım çeliklerinde, kesici kenarın sertliğinin muhafazasını, takım ömrünün uzamasını ve yüksek ısıya dayanımını sağlar. Bu sebeple özellikle yüksek hız çeliklerinde, takım çeliklerinde ve ıslah çeliklerinde, alaşım elementi olarak kullanılır. Yüksek çalışma sıcaklıklarında, çeliğin menevişlenip sertliğini kaybetmemesini sağladığından, sıcağa dayanımlı çeliklerin yapımında kullanılır.

2.4.11. Niobyum

Tane inceltici etkiye sahip olan element, aynı zamanda, akma sınırını da yükseltir. Kuvvetli karbür yapıcı özelliği ile sertliği de artırır.

2.4.12. Titanyum

Kuvvetli karbür yapıcı özelliği vardır ve sertliği artırır. Çelik üretimi esnasında deoksidan olarak da kullanılır. Tane inceltici etkiye sahiptir.

2.4.13. Kobalt

Yüksek sıcaklıklarda tane büyümesini yavaşlattığı için, daha çok hız çeliklerine ve sığağa dayanıklı çeliklere ilave edilir.

2.4.14. Alüminyum

En güçlü deoksidandır. Isıtmada tane kabalaşması ve yaşlanmayı azaltır. Tane inceltici özelliğe sahiptir.

2.4.15. Bor

Düşük ve orta karbonlu çeliklerin sertleşebilirliğini artırır özelliğe sahiptir. Sakinleştirilen çeliklere % 0.0005-0.003 kadar düşük oranda katılırlar.

2.4.16. Bakır

Sıcak şekillendirmede kırılma eğilimine sebep olduğu için % 0.5 oranı pek aşılmaz. Sünekliği ciddi oranda düşürmesine karşın korozyon dayanımını artırır ve sertliği artırdığı için ilave edilir.

2.4.17. Azot

Nitrür teşekkül ettirerek sertliği artırır. Nitrürasyon ile 1100 VSD kadar sertlik elde edilebilir. Mekanik dayanım ve korozyona karşı direnci artırmasına karşın yaşlanma meydana getirir. Çeliklerin alaşımli sayılabilmesi için içerebilecekleri elementlerin alt sınırları Tablo 2.4. de belirtilmiştir.

Tablo 2.4. Alaşım elementlerinin alt sınırı

Element	Alt Sınır (% Ağırlık)
Alüminyum	0.10
Bakır	0.40
Bor	0.0008
Bizmut	0.10
Kobalt	0.10
Krom	0.30
Kurşun	0.40
Mangan	1.60
Molibden	0.08
Nikel	0.30
Silisyum	0.50
Titanyum	0.05
Vanadyum	0.10

2.5. Çelik Tipleri

2.5.1. Kalitesiz yumuşak çelikler

Tasarımda kullanılacak malzemede çekme dayanımı, aşınmaya karşı direnç, sıcaklığa duyarlılık, çekme veya uzamadan kaynaklanacak sorunlar söz konusu değilse kalitesiz yumuşak çelikler kullanılabilir. Çöp tenekesi, bahçe parmaklığı gibi kullanım yerlerinde aranacak özellik sadece korozyona karşı dayanıklılık ise bu gibi yerlerde düşük karbonlu çelik kullanılması aynı zamanda malzemenin kolay kaynak yapılabilmesini, yumuşak olduğundan kolay şekil verilebilmesini ve böylece hem işçilikten hem malzeme maliyetinden tasarruf edilebilmesi sağlanmış olur.

Düşük karbon çeliği olarak belirtilen bu çelikler içeriğinde % 0.05-% 0.15 arasında karbon içermekte olup SAE1010 standartlarında tanımlanmışlardır.

2.5.2. Kolay kaynak çelikleri

Çelikte karbon oranı ve kalınlık arttıkça kaynak edilebilirlik zorlaşır ve ancak bir takım önlemler alınması ile gerçekleştirilebilir. 20 mm den ince malzemelerde C % 0.25'den az ise herhangi bir önleme gerek kalmadan malzemeyi kaynak etmek mümkün olur. Bu tip

çeliklere kolay kaynak çelikleri denir. Silolar, basınçsız kaplar, şaseler, genel amaçlı konstrüksiyonlar için kolay kaynak çelikleri seçilir.

2.5.3. Yapı çelikleri

Bu çelikler genellikle alaşımsız çelik olarak tanımlanır, mekanik özellikler daha çok karbon miktarına bağlıdır. Fakat başta azot ve fosfor olmak üzere, üretim hammaddelerinden ve üretim şekillerinden kaynaklanan mangan, silisyum, bakır ve kükürt elementleri de oldukça etkilidir.

Bir yapı çeliğinin belirtilen mukavemet değerleri sıcak veya soğuk haddeden geçerek almış olduğu form için geçerlidir. Eğer yapı çeliği tornada veya frezede talaş kaldırılarak inceltilecek olursa ortaya çıkacak olan mukavemet değerleri katalogda belirtilen değerlerden çok daha düşük olur çünkü yapı çeliklerinde iç kısımlardaki mukavemet değerleri kabuktaki mukavemet değerlerinden çok daha düşüktür. Bu nedenden yapı çeliklerine kesme ve delik delme işlemleri hariç talaş kaldırmalı işlemler ve ısı işlemler uygulanamaz. Yapı çelikleri temin edilmiş olduğu formda kesilir, bükülür, delinir ve kaynak edilebilir.

2.5.4. İmalat çelikleri

Sade karbon veya alaşımsız makine imalat çeliği olarak da bilinirler. İmalat çeliği yaklaşık % 0.20-0.60 arasında karbon içeren alaşımsız çeliklerdir. İçerdiği yüksek oranda karbon miktarından dolayı karbon çeliği olarak da anılırlar. İmalat çeliğinin sertleşebilirliği içerdiği karbon miktarına paralel olarak artarken, tokluğu ise karbon miktarı ile ters orantılıdır. Daha yüksek sertleşebilirlik beklentisi olan uygulamalarda düşük alaşımlı çelikler tercih edilmektedir.

Yüksek mukavemet istemeyen makine parçalarında imalat çelikleri sıklıkla kullanılmaktadır. Miller, pimler, dişliler, dişli parçaları, cıvatalar, akslar gibi parçalar kullanılarak; taşıt, motor, makine ve aparat yapımında; kancalar ve kalıp setlerinde imalat çeliği kullanılmaktadır. Özellikle makine imalat sektörü imalat çeliklerini tercih etmektedir. Aynı zamanda yüzey sertleştirmeye uygun bir çelik grubudur. Düşük karbonlu imalat çeliklerine sementasyon işlemi uygulanırken, daha yüksek karbonlu imalat çeliklerinin yüzeyi alevle ya da indüksiyonla sertleştirilebilmektedir.

İmalat çeliklerine örnek olarak Ç 1030, 1040, 1050, 1060 kalitelerinin yanında C30, C40, C50 ve C60 gibi muadil kaliteler de verilebilir.

2.5.5. İslah çelikleri

Bu çelikler yalın karbonlu çelik olabildiği gibi alaşım çeliği de olabilirler. Alaşım çelikleri içeriğinde Ni, Cr, Mo, V, W gibi elementlerin yer almış olduğu çeliklerdir. Bu çeliklerin imalat çelikleri grubundan en önemli farkı derinlemesine (tam) sertleşebilir çelik olmalarıdır.

Alaşımli çeliklerin iç bölgelerde sertleşebilme yeteneği düz karbonlu çeliklere göre daha fazladır. Çünkü içeriğinde bulunan Cr, Ni, Mo gibi elementler su verme esnasında çeliklerin çatlama, çarpılma risklerinin düz karbonlu çeliklere göre daha az olmasını sağlar. Ç 1020, 1040, 4140, 5160 ıslah çeliklerindedir.

İslah çeliklerinde sertleşebilirlik özelliklerinin yanında, yüksek dayanım ve süneklik de istenir. Yeterli seviyede sertlik elde edilebilmesi için, ıslah çelikleri diğerlerine nispeten yüksek karbon içerirler. Kalın kesitli parçalar için sertlik derinliğinin en önemli kriter olması sebebiyle, bu parçalar alaşımli ıslah çeliklerinden imal edilirler.

İslah çelikleri kimyasal bileşimlerine göre 4 ana grupta toplanır.

1. Alaşımli ıslah çelikleri
2. Mangan alaşımli ıslah çelikleri
3. Krom alaşımli ıslah çelikleri
4. Krom-Molibden alaşımli ıslah çelikleri

2.5.6. Soğuk çekme çelikler (transmisyon çelikleri)

İmalat ve ıslah çelikleri normal oda sıcaklığında bir veya birkaç kalıptan geçirilerek belli bir şekil almaları sağlanıyorsa bu çeliklere soğuk çekme çelik veya transmisyon çeliği denir. Soğuk çekmeden maksat ısı işleme gerek kalmadan malzemenin akma ve kopma mukavemetlerini arttırmaktır.

Sıcak haddelenmiş sacın sadece inceltilerek mekanik özelliklerinin geliştirilmesi gerekiyorsa çekme yerine oda sıcaklığında haddeleme yeterlidir. Bunlara ise soğuk haddelenmiş çelik denilir.

2.5.7. Paslanmaz çelikler

Az alaşımlı ve alaşımsız çelikler ortama bağlı olarak hızla paslanır ya da kimyasal aşınmalara uğrarlar. Tahribattan ve paslanmadan korunmak amaçlı boyar maddeler kullanılması veya ilave önlemler istenen korumayı sağlamayabilir. Bu gibi durumlar için paslanmaz çeliklerin seçimi önem taşır.

İçerdiği Cr, Si ve Al gibi elementler, oksijenle birleşerek, çok ince, yoğun ve yapışkan bir oksit filmi tabakası oluştururlar. Bu tabaka paslanma oluşumunu engeller.

Paslanma olayı sadece çeliğin alaşım durumuyla ilgili değildir. Parçaların talaşlı işlem özellikleri de paslanma konusunda önemlidir. Örneğin; yüzeyi hassas taşlanmış bir parçanın paslanma oranı, kötü yüzey kalitesine sahip bir parçanın paslanma oranından daha düşüktür.

Paslanmaz çelikler şu şekilde sınıflandırılır;

- Krom çelikler
- Krom-Nikel çelikler
- Krom-Mangan çelikler
- Çok fazlı çelikler

2.5.8. Takım çelikleri

Yüksek alaşımlı ve yüksek oranda karbon içeren çeliklere takım çelikleri denir. Bu malzemelerin ıslah çeliklerinden en önemli farkı içyapılarındaki temizlik nedeni ile belirtilen mukavemet ve sertlik değerlerinde sapmanın minimum olmasıdır. Bu nedenle takım çelikleri ıslah çeliklerinden çok daha fazla pahalıdır.

Bu malzemeler ısıtıl işlem görmemiş olarak satın alınır ve kullanıcı tarafından işlendikten sonra ısıtıl işlem uygulanır. Bu çelik ancak ısıtıl işleminden sonra kendinden beklenen özellikleri sağlayabilir.

2.6. AISI 4140 Çeliği

AISI 4100 serisi olan AISI 4140 çeliği, düşük alaşımlı Cr-Mo'li ıslah çeliklerinin en yaygın kullanım alanına sahip dövme kalite çelikler, düşük alaşımlı yapı çelikleri, orta karbonlu çelik ve alaşımlı çelik olarak bilinmektedir.

Otomobil, uçak parçaları, inşaat ve tarım makineleri parçaları, takım tezgâhları, , dingil, krank mili ve dişli gibi çok sayıda alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, makine çelikleri, türbin motorları, soğuk çekme mil ve çubukları, yaylar, fren halka ve kolları, gemi zincir ve demirlerin yapımında, turbo jeneratörlerin, demir yol tekerlekleri ve millerinde, starter dişlileri gibi birçok yerde kullanılmaktadır.

İçerdiği Cr ve Mo alaşım elementlerinden dolayı, su verme işleminden sonra sert martenzitik bir yapı oluşturabilmesi, süneklik, tokluk ve mukavemet gibi mekanik özellikleri bir arada bulundurur. Tüm bu nedenlerden ötürü AISI 4140 çeliği her zaman yaygın kullanım alanına sahip bir çeliktir [27].

AISI 4140 çeliği aynı gruptan çeliklerle kıyaslandığında dayanım ve tokluğu sertleşebilirliğine göre daha iyidir. Ancak çalışma ortamlarındaki performansı normal değerlerdedir. Karbon içeriği yüksek olduğundan dolayı mukavemeti artar ve daha iyi sertleşir. 1650 MPa'a kadar çekme dayanımlarının çıktığı görülebilir. Temperleme ve sertleştirme ısıtıl işlemine uygundur. Çalışma ortamlarındaki dayanımı 480 °C'den sonra hızlı bir şekilde azalır. Isıtıl işlem ve gerilme konsantrasyonu ile çeşitli sıcaklıklarda dönüşüme uğrayabilirler.

Yüksek dayanım istenildiğinde, ısıtıl işlem sonucu AISI 4140 çeliğinde hidrojen gevrekliği oluşabilir. Bu sırada hidrojen gevrekliğini önlemek ve süneklik kazandırmak için 2-4 saat arasında 190 °C'de ısıtıl işleme tabi tutulurlar. Sürünme dirençlerini 540 °C'ye kadar korurlar. 1100-1200 °C'de kolayca şekillendirilebilirler ve sıcak şekillendirildikten sonra yavaşça soğutulmalıdırlar. Bu ısıtıl işlemlerden sonra kaynak kabiliyeti iyileşir ve soğuk şekillendirme ile % 62 oranında şekillendirilebilirler.

Merdane, çubuk, plaka, levha, mil veya döküm yöntemiyle üretilip şekillendirilebilirler. Yüksek dayanıma sahip makine parçaları ve elemanlarında kullanılır [28].
Tablo 2.5., 2.6., 2.7., 2.8., 2.9. da AISI 4140 çeliğinin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.5. AISI 4140 çeliğinin kimyasal bileşimleri [29]

Element	Ağırlıkça %
C (karbon)	0.38-0.43
Mn (mangan)	0.75-1.00
Si (silisyum)	0.20-0.35
Cr (krom)	0.80-1.10
Mo (molibden)	0.15-0.25

Tablo 2.6. AISI 4140 çeliğinin genel özellikleri

Kategori	Çelik
Sınıf	Alaşımli çelik
Tip	Standart
Ortak İsimler	Krom-molibden çelik
Belirtme	Fransa: AFNOR 40 4 CD, AFNOR 42 4 CD Almanya: DIN 1,7225 İngiltere: BS 708 A 42, 40 BS 709 M BS, 708 M 40 Amerika Birleşik Devletleri: AMS 6378, AMS 6379, AMS 6381B, AMS 6382, AMS 6382G, AMS 6390, AMS 6390A, AMS 6395, ASTM A322, ASTM A331, ASTM A505, ASTM A519, ASTM A547, ASTM A646, MIL SPEC MIL-S -16974, SAE J404, SAE J412, SAE J770, G41400 UNS

Tablo 2.7. AISI 4140 çeliğinin mekanik özellikleri

Özellikleri		Koşullar	
		T (°C)	Yapılan İşlem
Elastik modülü (GPa)	190-210	25	815 °C tavllanmış olarak
Çekme Dayanımı (MPa)	655.0	25	
Akma Dayanımı (MPa)	417.1		
Uzama (%)	25.7		
Kesit Daralması (%)	56.9		
Sertlik (HB)	197	25	815 °C tavllanmış olarak
Darbe Direnci (J) (Izod)	54.5	25	815 °C tavllanmış olarak

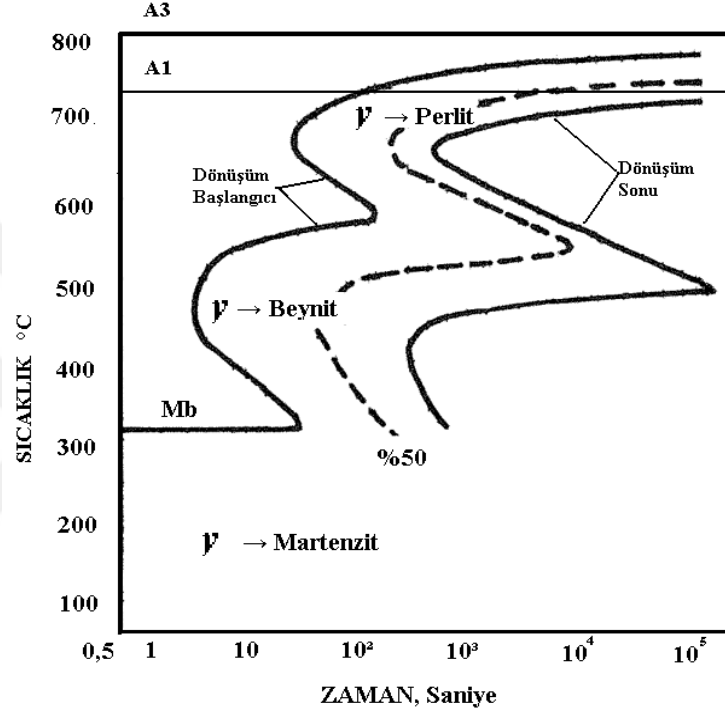
Tablo 2.8. AISI 4140 çeliğinin ısı ve elektriksel özellikleri

Özellikler		Koşullar	
		T (°C)	Yapılan İşlem
Isıl Genleşme ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	12.3	20-100	Yağda sertleştirilmiş, 600°C 'de temperlenmiş
Isıl İletkenlik (W/m-K)	42.7	100	
Özgül Isı (J/kg-K)	473	150-200	
Elektrik Direnci ($10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$)	222	20	

Tablo 2.9. AISI 4140 çeliğinin ısı işlem özellikleri

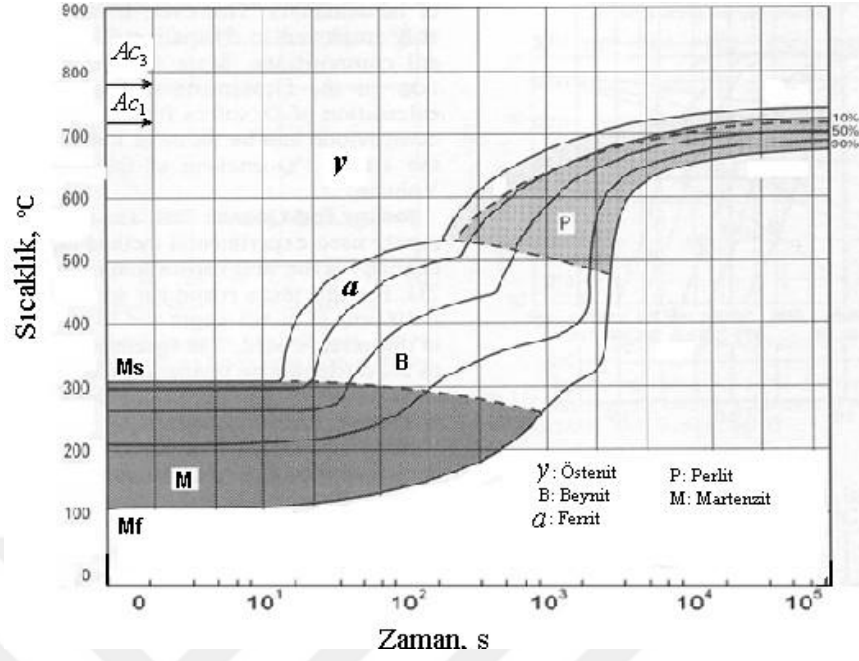
Özellikler	Koşullar	
	Sıcaklık (°C)	Soğutma
Sıcak Şekil Verme	850-1050 °C	
Normalizasyon	840-880 °C	
Yumuşak Tavlama	680-720 °C	
Sertleştirme	820-860 °C	Su
	820-860 °C	Yağ

Östenit dönüşümü sırasında görülen ve öncelikle dönüşüm ürününün özelliklerini belirleyen çok yönlü olayların irdelenmesinde zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramlarından faydalanılır. TTT (Time-Temperature-Transformation) ve CCT (Continuously-Cooling-Transformation) diyagramları olarak bilinen bu diyagramlarla dönüşüm olayları sıcaklık ve zamana bağlı olarak gösterilir.



Şekil 2.2. AISI 4140 çeliğine ait TTT diyagramı

Şekil 2.2’te izotermik dönüşüm için AISI 4140 çeliğine ait TTT diyagramı görülmektedir. TTT diyagramı ile malzememiz istediğimiz yapı göz önüne alınarak belirlenen bir sıcaklığa hızla soğutulur ve bu sıcaklıkta bekletilir. İsteddiğimiz dönüşüm gerçekleşinceye kadar sabit sıcaklıkta bekletilir ve tekrar soğutulur. Çelikte yapının tamamen perlit ya da beynit olması istendiğinde bu diyagramdan faydalanılır. AISI 4140 çeliğinin yapısının tamamen perlit ya da beynit olmasını istediğimizde Şekil 2.2’deki değerler okunarak bu yapılar elde edilir.



Şekil 2.3. AISI 4140 çeliğine ait CCT diyagramı [30]

AISI 4140 çeliğine ait CCT diyagramı Şekil 2.3'te görülmektedir. Bu diyagram, özel soğutma ortamlarında ulaşılabilen soğutma hızının, östenitten martenzite veya beynitten perlitte faz dönüşümünün etkilerini içermektedir. Bu diyagramlar su verme ortamının etkilerinin teorik olarak görülebileceği diyagramlardır [31].

AISI 4140 çeliklerinin soğutma prosesini anlamak için hayli kritik öneme sahip olan martensit dönüşümünün başlangıç ve bitiş sıcaklıkları bu diyagramdan okunabilir (Şekil 2.3). CCT diyagramı ile soğutma hızları sonunda malzemedeki yapılar görülür. Çok hızlı soğutma ile yapının tamamen martenzite dönüşeceği şekilde çok acık bir şekilde görülmektedir. Çok hızlı olmamak kaydı ile örneğin yağda soğutularak beynitik bir yapı elde edilebilir. Şekil 2.3'te malzemedeki ferrit ve perlit yapısı oluşturmak için yavaş soğuma gerektiği görülmektedir.

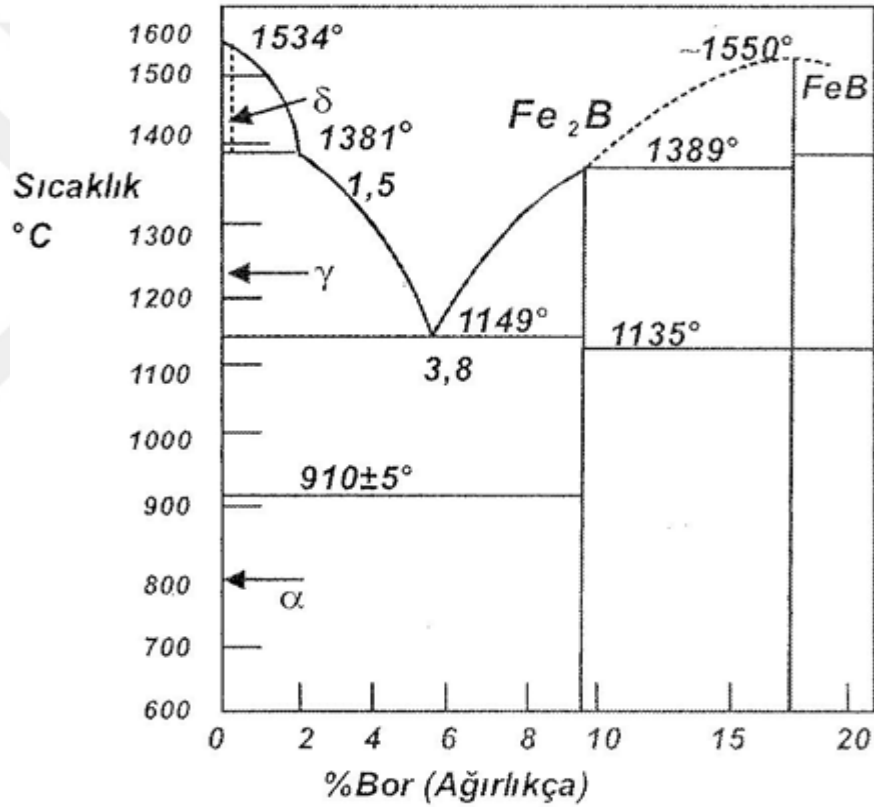
BÖLÜM 3

BORLU ÇELİKLER

3.1. Demir-Bor Bileşikleri

3.1.1. Demir-Bor denge diyagramı

Demir- bor denge diyagramında Fe_2B tetragonal ve FeB ortorombik kristal yapıya sahip ferrobor adı verilen fazlar vardır.



Şekil 3.1. Demir-bor denge diyagramı [32]

Şekil 3.1. de Fe - B ikili denge diyagramında Fe_2B 'nin bileşiminde % 8.83, FeB 'nin bileşiminde ise % 16.2 oranında bor bulunmaktadır. İkili denge diyagramına göre % 9-16 arasında bor içeren alaşımda faz dağılımı Fe_2B ve FeB bileşiklerinden veya kristallerinden ibarettir. % 16.2'den fazla bor içeren alaşım ise FeB ve B kristallerinden oluşur. 1149 °C sıcaklık ve % 3.8 bor bileşiminde bir ötektik nokta oluşmaktadır [33, 34].

3.1.2. Ferrobor

Ferrobor ilk olarak 1893 yılında Henri Moissan tarafından karbon astarlı ve tek fazlı bir elektrik ark fırınında elde edildi. Burada fırına yüklenen şarj; demir-asit borik ve kömürden ibarettir [35].

C ve alaşımlı çeliklerin sertliğini arttırmak amacıyla, ferrobor kullanımını 1930'lu yıllardan beri bilinmektedir. Çeliğe % 0.003-0.004 miktarlarında B ilavesi ile tane boyutunda küçültmeye ihtiyaç duymaksızın sertliği artırılabilir. Bu az miktardaki bor ilavesi ile yüksek oranda Mn, Ni, Cr gibi metalleri içeren alaşımlar ile aynı sertlikte malzeme üretilmiştir. Özellikle ABD'de ıslah çeliklerinde, pahalı ve az bulunan Ni ve Mo yerine büyük miktarlarda kullanılmaktadır. 1975 yılında ferrobor alaşımlarının üstün manyetik özelliklerinin belirlenmesi, bu alaşımların elektrik sektöründe büyük kullanım alanı bulmasına sebep olmuştur. Özellikle % 3 B, % 5 Si içeren demir esaslı alaşımların, amorf metal (metalik cam) olarak sac haline getirilerek trafolarla kullanılabilmesi, geleneksel tane yönlenmiş silisyumlu saclara göre 1/3 oranında çekirdek kayıplarını azaltmıştır [36].

Bor, 1982 yılından bu yana tanınmakta olan Fe-R-B (R=nadir toprak metal) esaslı sürekli mıknatısların önemli bir bileşimidir. Bu tip mıknatısların üretiminde ferrobor kullanılmaktadır. Ferrobor ağırlık bakımından % 10-20 arasında bor ihtiva eden bir demir bor alaşımıdır. Ferrobor parlak gümüş rengindedir. Ancak uzun süreli rutubetli havada kalırsa, parlak gümüş rengi kaybolur ve yüzeyin rengi kırmızı lekeler içeren mat griye dönüşür. % 0.04-42 B içeren ferrobor alaşımları atmosferik şartlarda ve yüksek sıcaklıklarda (800-1000 °C) oksitlenmeye karşı dirençlidir. B konsantrasyonunun % 0.32'den fazla olan alaşımlarda koruyucu etkisi bulunan $Fe(BO_2)_2$ fazı oluşmaktadır [37].

3.1.3. Çelik üretiminde ferroborun önemi

Ferroborun en çok kullanıldığı alanlardan biri çelik sanayidir. Çeliğe ilave edilen çok düşük oranlardaki bor, hem sade karbon çelikleri ve hem de alaşımlı çeliklerin sertleşebilirliğini arttırmaktadır. Sertleştirmeyi arttırmak için çeliğin içine 5-15 ppm (maksimum 30 ppm) bor ilave edildiği bu güne kadar ki çalışmalarda görülmektedir. B, çeliğe ilave edilen diğer sertleştirici elementlerin, örneğin C, Mn, Cr, Mo, v.b.

sertleştirme derecesini de arttırdığı söylenmektedir. Çeliğin içine çok az miktarda ilave edilmesi durumunda çeliğin sertliğini arttırması nedeniyle bor, çelikte kullanılan pahalı alaşım elementleri maliyetinde tasarruf sağlar. Alaşımli çeliklere % 0.0010-0.0030 arasında bor ilave edilmesi, bu çeliklerin yapısında gerek duyulan Ni, Cr ve Mo miktarlarını düşürür [37].

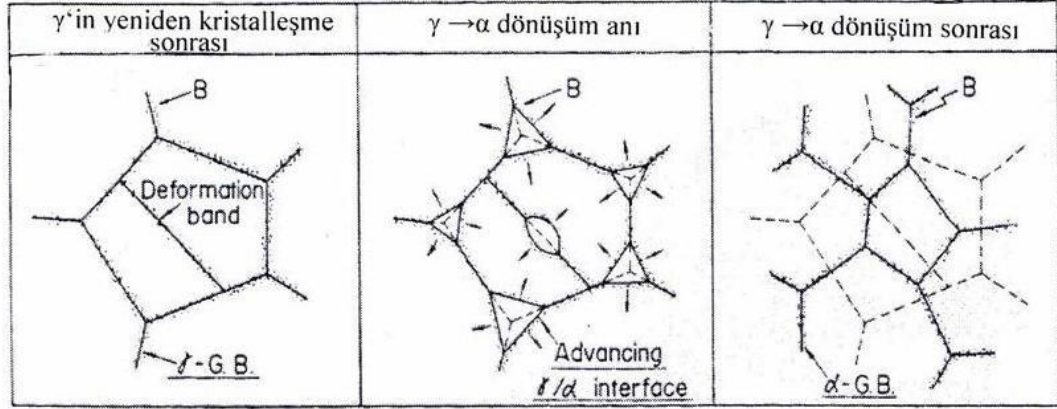
Birkaç yüz çeşit borlu çelik mevcuttur ve bunlar ISO, AISI, AFNOR ve DIN tarafından standartlaştırılmıştır. Borlu çeliklerin çoğu Mn ve Cr (% 0.5'e kadar) ile alaşımlandırılmıştır. Bazı hallerde Ni ve Mo içerirler. C oranları, % 0.15 ile % 0.45 arasında değişir. Borlu çelikler başlıca sertleştirilmiş ve temperlenmiş, bazı hallerde ise yüzey sertleştirilmiş koşullarda kullanılırlar. Borlu çelikler başlıca Al ile deokside edilirler. Deoksidasyon sonucu yapıda % 0.003 oranında alüminyum kalır. Borlu çeliklere, genellikle (% 0.03 Ti'lu), nitrürosyon işlemi de uygulanır [37, 38].

Bor, çelik içerisinde aşağıda belirtilen şekillerde oluşabilir,

- a) Çözünmüş bor "Serbest Bor" (çoğunlukla tane sınırlarında çökelti oluşturmuş şekilde)
- b) Oksitlenmiş bor (B_2O_3)
- c) Bor nitrür (BN)
- d) Bor karbür ($M_{23}(B,C)_6$)
- e) Ferrobor (Fe_2B , FeB)

3.1.4. Serbest bor (efektif bor)

Bor ilaveli olarak üretilecek çeliklerde, mekanik özelliklerin iyileştirmesinde ilk parametre "Çözünmüş Bor" miktarıdır. Çünkü östenitleme sırasında bor karbürlerin çözünmesi sonucu oluşan bor (serbest bor), ıslah sırasında ince bor karbür $M_{23}(B,C)_6$ bileşiği halinde tane sınırlarında çökerek malzemenin sertleşebilirliğini, akma ve çekme dayanımını arttırmaktadır (Şekil 3.2). Tane sınırlarında çökelen bor karbürler toplam bor miktarının ancak küçük bir kısmını oluştururlar. Kalan serbest bor ise "Efeaktif Bor" olarak adlandırılır ve önemli olan efektif bor miktarının elde edilmesidir.



Şekil 3.2. Östenitten ferrite dönüşümü esnasında tanelerde meydana gelen değişiklik [39]

Çözülmüş bor “Serbest Bor” (çoğunlukla tane sınırlarında çökelti oluşturmuş şekilde) tane sınırlarında ve tane içerisinde ara yer ya da yer alan katı eriyik çözeltisi şeklinde bulunmaktadır. Çelik içerisinde mekanik özellikleri iyileştirmesi açısından daha çok tercih edilmektedir. Fakat olması gereken optimum miktara elementel bor ve diğer demir içerisinde oluşumların hepsi hesaplanarak bor oranı belirtilir.

Bor, α , γ ve δ demirinde çok az çözünebilmektedir. α - demirde 910 °C de maksimum çözünebilirlik 20 - 80 ppm iken, buna karşılık γ - demirinde 1150 – 1170 °C de 55 - 260 ppm bor çözülmektedir. Çözülebilirliğin genişliği, esas malzemenin saflığı ve tane boyutundaki değişiklikleri belirlemektedir [6].

3.1.5. Bor oksit

Elementel bor oksitlendiği zaman büyük bir enerji açığa çıkarır ve bor oksit (B_2O_3) oluşur. Bu şekilde bordan enerji üretilebilir ve elementel bor fiziksel, kimyasal ve termodinamik bakımdan bu gün enerji kaynağı olarak kullanılan birçok maddeden daha iyi özelliklere sahiptir. Diğer taraftan sodyum bor hidrür de katalitik olarak su ile reaksiyon verebilme ve yakıt pilinde kullanılabilme imkânları ile iyi bir hidrojen taşıyıcısıdır ve geleceğin enerji kaynağı olarak bakılmaktadır.

3.1.6. Bor nitrür

Bor nitrür, taşıdığı yüksek ısıl şok direnci, ısıl iletkenlik, elektriksel yalıtkanlık, kimyasal kararlılık ve yağlayıcılık gibi üstün özelliklere sahip sentetik bir malzemedir. Bu özellikleri nedeniyle metalürjik yüksek sıcaklık uygulamalarında, elektrik-elektronik

endüstrisinde, seramik kompozit malzemelerin yapımında ve kimya endüstrisinde toz, şekillendirilmiş kütleler, sprey ve macun biçimlerinde kullanılmaktadır ve yeni kullanım alanları bulmaya yönelik bir potansiyeli de sahip olduğu özelliklerde barındırmaktadır [40]. Bor nitrürün üç farklı kristal formu mevcuttur; hegzagonal formu (h) BN, kübik formu (c) Bor nitrür (BN), üçüncü ticari Bor Nitrür tipi ise kimyasal buhar indirgenmesi ile üretilen Piroliktik Bor Nitrür'dür. Bunlar çok farklı fiziksel özelliklere sahiptirler ve çok farklı uygulamalarda kullanılırlar. Hegzagonal bor nitrürün kalitesine göre ticari sınıflandırılması ve kimyasal kompozisyonu Tablo 3.1'de görülmektedir [41].

Tablo 3.1. Bor nitrür ticari kalite sınıflandırması [41]

Bileşenleri	Kompozisyon (%)		
	Refrakter kalite	Seramik kalite	Yüksek kalite
BN	92-96	>98.5	>99.5
B₂O₃	5-7	0.1	<0.003
Oksijen	5	0.5-1.5	0.3
Karbon	0.1	0.1	0.1
Metal kalıntılar	0.2	0.2	>0.01

3.1.7. Bor karbür

Bor karbür (B₄C) siyah parlak renkli bir malzeme olmasından ve sertliğinden dolayı (3000 Knoop) kara elmas olarak da adlandırılır. Yoğunluğunun düşük olması (2.37 g/cm³ ile 2.52 g/cm³ arası) ve erime noktasının yüksekliği (2450 °C) bor karbürün kullanım alanlarını artırmaktadır. Yoğunluk değişimine, bor karbür bileşiğinin içindeki borun ve karbonun atomik kütlelerinin (bor için 0-11, karbon için 12-13) değişimi neden olmaktadır. Bor karbürün doğrudan kullanım yerleri makine, kimya ve nükleer sanayilerdir. Bor karbür (B₄C) döküm çeperlerinde yüksek sıcaklığa dayanıklı malzeme olarak, yanma için püskürtme memelerinde de aşınmaya dayanıklı malzeme olarak kullanılan önemli bir bileşiktir.

Günümüzde hem savunma sanayi hem de enerji için kullanımı her geçen gün yaygınlaşan nükleer teknolojinin vazgeçilmez malzemeleri arasına girmiştir. Borun nötron tutucu özelliği nedeniyle bor karbür nötron kalkanı olarak nükleer atık nakliyesi tankları ve depolama havuzlarında zırhlama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca reaktör denetim, kolay taşınabilir kalkanlar gibi alanlarda kolaylıkla kullanılabilir. Nükleer yakıtların kaplanması sonucu verimli yanmanın yanında denetimli yanmanın da sağlanması, nükleer reaktörlerin önünde yeni ufuklar açmaktadır. Nükleer tepkime esnasında denetleme sağladığı gibi dimetil eter elementler borca zenginleştirilmiş borik asit veya ferrobora haline dönüştürüldüğünde nükleer reaktörün denetim çubuklarının yapımında da kullanılmaktadır. Bor, 304 adı verilen ve bor karbür ihtiva eden yeni bir paslanmaz çelik, atılmış nükleer yakıtın taşındığı kapların imalinde kullanılmaktadır [42]. Bor karbür düşük özgül ağırlığı ve yüksek esneklik modülü nedeniyle hafif silahlarda da kullanılır. Bu tür silahlar personel silahları ve helikopterlerde kullanılan silahlardır. Bor karbür ve cam yönünden mamul zırh malzemeleri de imal edilmiştir. Bu zırh malzemesi, AH-Cobra helikopterlerinde kullanılmıştır. Gerek askeri gerekse sivil havacılıkta yüksek irtifa ve 6000-12000 km/saat gibi yüksek hızlara ulaşacak uçakların yapılması ve da bölgesinin 1800 °C sıcaklıklara kadar ulaşabileceği NASA tarafından saptanmıştır. Uzay mekiklerinin ana gövde kafes sisteminde, giriş ve iniş takım parçalarında çok sayıda tek yönlü bor elyaf alüminyum metal matrisli kompozit borular kullanılarak ekstürüze alüminyum sistemine oranla % 40'ın üzerinde bir ağırlık tasarrufu sağlamıştır. Uzay mekiklerinde kullanılan malzemelerin dayanıklılığı ile birlikte hafifliğinin de önemi büyüktür. Uzay mekiklerinin yakıt ağırlığının önemi de bilinmektedir. Bu nedenle kompozit maddenin ağırlık kazancının ne kadar önemli olduğu açıktır. Jet motorları, fan kanatları, uçak kanat yüzeyleri ve gövde destekleri, iniş takımları parçaları, bisiklet iskeleti ve hatta golf sopalarına kadar geniş bir kullanım alanı vardır. Bir diğer kullanım alanı ise grafitle birlikte 1750 °C'ye kadar sıcaklığı ölçebilen ısı-çift üretimidir. Otomobil teknolojisine sağladığı % 10'luk ağırlık tasarrufu ile % 5'lik yakıt tasarrufu, ayrıca içten yanmalı motorlarda ve diğer hareketli makine parçalarında aşınma direnci ve ısı şokları önem taşımaktadır [40, 43, 44].

3.1.7.1. Bor karbürün yapısı

Bor karbür bileşiği ilk defa 1883 yılında keşfedilmiştir. Refrakter bor bileşiklerinden biri olan bor karbür; alümina, silisyum karbür, bor nitrür ve elmas gibi maddeleri

kapsayan metal dışı sert maddeler grubunda ele alınan bir seramiktir. Bor karbür bileşikleri $B_{4-0}C_{10-4}$ 'ye kadar geniş bir aralıkta son zamanlarda yapılmaktadır. Borun yüksek buhar basıncından dolayı, bor bileşiğindeki karbon bileşimi işlem sıcaklığı ile yükselir. Ticari bor karbürün bileşimi B:C=4:1 oranındadır. Bor karbür, elmas ve kübik bor nitrürden (c-BN) sonra bilinen en sert malzemedir. 1300 °C üzerinde elmastan daha serttir. Bor karbür SiC ve grafitle hemen hemen aynı olan düşük ısı iletkenlik değerine sahiptir ve diğer seramik malzemelerde olduğu gibi sıcaklık ile azalır. Bor karbürün elektrik-ısı-elektronik özellikleri B:C oranı ve safsızlık miktarı ile değişir. Termoelektrik gücü oldukça yüksek olup sıcaklık ile artmaktadır [40, 43-45].

Özellikle bor ve karbon atomlarının birim hücredeki dağılımı ve bor atomları ile oluşturduğu örgü yapısı tam olarak bilinmemektedir. Bunun yanında fiziksel özellikleri çok iyi bilinmektedir. Kaynak çalışmalarında pek çok B-C faz diyagramları tanımlanmakla birlikte bor-karbon sisteminde bileşim, erime noktası ve olası ikili faz diyagramlarının kararlılığı üzerinde kesin bir anlaşmaya varılmamıştır [46].

3.2. Borlu Çeliklerin Kullanım Alanları

Yüzlerce farklı kullanım alanına sahip olan B ve B türevi ürünlerin endüstriyel anlamda yeni sayılabilecek uygulama alanlarından biri de çelik endüstrisidir. Her ne kadar borun çeliklerde sertleşme kabiliyeti üzerindeki olumlu etkisi 1940'lı yıllardan beri bilinse de ancak yakın zamanda metalurji sanayinin gelişimi ile borlu çelik üretimindeki sorunlar aşılabilmiş ve böylelikle bu tür çelikler farklı iş kollarınca kullanılabilir olmuşlardır. Çelik endüstrisinde bor, alaşım elementi olarak katıldığı çeliğe yüksek oranda sertleşme kabiliyeti kazandırması ile tanınır [47].

Borlu çelikler, uygulanan ısı işlemler sonrasında yüksek sertlik değerlerine ulaştıkları, aynı zamanda sürtünmeye ve aşınmaya karşı çok iyi direnç gösterdikleri için genellikle ağır çalışma koşullarına uygun olup toprak ve yol işleme aletleri ile ziraat aletleri yapımına ve otomobillerde pasif güvenlik gerektiren yerlere önerilmektedir.

Borlu çelikler yüksek sertlik ve yüksek aşınma dayanımı sergileyen alaşımli çeliklerdir. Kolay işlenebilir olmaları ve uygulanan ısı işlemler sonrasında da çok iyi mekanik özellikler sergilemeleri bu tip çeliklerin en önemli özelliklerindedir. Benzer kabiliyetleri sunan yüksek alaşımli çeliklere göre ucuz olmaları da dikkate alınır,sa,

borlu çeliklerin gittikçe zorlaşan ekonomik koşullarda makine imalat sanayi kolları için iyi bir alternatif oluşturdukları söylenebilir.

Özellikle son yıllarda Avrupalı otomotiv üreticileri tarafından borlu çeliklerin darbelere maruz kalabilecek yerlerde sürücü ve yolcu güvenliğini arttırmak amacıyla sıklıkla kullanıldığı bilinmektedir. Forklift kollarında, yaylarda, soğuk çekilmiş çubuklarında, inşaatlarda, vites dişlilerinde, kar küreme makinelerinin iş gören kısımlarında, tank paletlerinde, kepçelerin tırnaklarında ve benzeri aşınma dayanımı gerektiren iş parçalarının yapımında yine borlu çeliklerin kullanıldığı görülmektedir [47-49].

3.3. Borlu Çeliklerin Mekanik ve İşlenebilme Özellikleri

Makine imalat sanayide kullanılan malzemeler çekme mukavemeti, akma sınırı, yüzey sertliği, çentik darbe mukavemeti gibi mekanik özelliklerin yanı sıra kaynak edilebilme, sertleşme ve şekil değiştirme kabiliyetine ek olarak malzemenin işlenebilme özellikleri de dikkate alınmalıdır. Yani, bir malzemenin mekanik özellikleri kadar kolay işlenebilme özellikleri de önemlidir. Borlu çelikler, ısıtma işlem öncesi oldukça düşük mekanik özelliklere sahiptirler. Yani, sıcak hadde ürünü yassı levha halinde satın alınan B'lu çeliklerin mekanik özellikleri, benzer karbonlu yapı çeliklerinin mekanik özellikleriyle yaklaşık olarak aynıdır. Bunun anlamı, sıcak veya soğuk şekil vermenin veya derin çekmenin bu tip çeliklerde oldukça kolay olmasıdır.

Normal yapı çeliklerinin şekillendirilmesinde kullanılan yöntemler, aynı takımlarla ve aynı işleme hızlarıyla bu tip çeliklerde de kullanılabilir. Borlu çeliklerin kaynağı da zor değildir. Bunun nedeni, düşük alaşım içeriğine sahip olmalarıdır. MIG kaynağı veya direnç nokta kaynağı borlu çeliklerin kaynağında kullanılabilen kaynak yöntemleridir. Bunlardan direnç nokta kaynağı ısıdan etkilenmiş daha küçük bir bölgeye neden olduğundan genelde tercih edilir. Borlu çeliklerin korozyon ve yorulma dirençlerinin de yüksek olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya konmuştur. Özellikle düşük karbonlu beynitik çeliklere yapılan bakır-bor katkısı ile üretilen çeliklerin gemi, köprü ve petrol platformlarının yapımında kullanılıyor olması korozyon direncinin yüksekliğinin bir göstergesidir [48].

BÖLÜM 4

ISIL İŞLEM

4.1. Çeliklerin Isıl İşlemi

Isıl işlem, metal veya alaşımlarına istenen özellikleri kazandırmak amacıyla katı halde uygulanan kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleri olarak tanımlanır.

Isıl işlemler, kırılabilirliği (gevrekliği) azaltmak, darbe direnci (tokluğu), aşınma direnci, sertlik, çekme ve akma mukavemetini artırmak, plastik şekil vermeyi kolaylaştırmak, soğuk şekil verilmiş parçalarda tane yapılarını düzeltmek gibi amaçlar için yapılır. Bu amaçları gerçekleştirmek için martenzit ve beynit fazı oluşturma, difüzyonla alaşım elementi ekleyerek karbür tanecikleri oluşturma, tane boyutlarını küçültme ya da büyütme, tane biçimlerini değiştirme, gibi yöntemler kullanılır.

Çeliğe uygulanan temel ısıl işlemler östenit fazının dönüşümü ile ilgilidir. Çeliğin fiziksel ve mekanik özellikleri içerdiği dönüşüm ürününün cinsine miktarına ve metalografik yapısına bağlıdır. Isıl işlem esnasında başlangıçta, östenitleştirme işlemi için çelik malzeme alt kritik sıcaklık çizgisinin (A_{c1}) üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Burada tamamen içyapı dönüşümü gerçekleşene kadar bekletilir ve uygun bir hızla soğutma işlemi yapılır. Ötektoid altı çelikler üst kritik sıcaklık çizgisinin (A_{c3}) 40-60°C üzerindeki sıcaklıklarda, ötektoid üstü çelikler ise A_{c1} ile bu çeliğe ait üst kritik sıcaklık çizgisi arasındaki sıcaklıklarda östenitlenir.

Isıl işlemler genel olarak 4 grupta toplanabilir:

4.1.1. Tavlama

Çeliğin katılaşma eğrisinin altındaki sıcaklığa kadar ısıtılıp, orada bekletilmesi ve soğutulması işlemidir. Yani malzeme daima katı haldedir.

4.1.1.1. Normalizasyon

Tane küçültmek, homojen bir yapı elde etmek, mekanik özellikleri iyileştirmek ve ötektoid üstü çeliklerde tane sınırlarında bulunan karbür ağını dağıtmak için yapılır. Ötektoid altı çelikler A_{c3} , ötektoid üstü çeliklerde A_{cM} eğrisinin yaklaşık 40-50°C

üstünde sıcaklığa kadar ısıtılıp, fırın dışında sakin havada soğutma işlemidir. Normalizasyon işlemi sonrası dövülmüş, haddelenmiş, iri taneli ve eş yönlendirilmiş yapılar düzelir ve malzeme her zaman kazanabileceği özelliklere (çekme mukavemeti, süneklik gibi) geri döner.

4.1.1.2. Gerilme giderme

Dökülmüş, sıcak dövülmüş, kaynak edilmiş parçalar ve soğuk çekilmiş malzemelere uygulanır. Yani üretim esnasında malzemede oluşacak iç gerilmeleri azaltma amacıyla uygulanır. Gerilme giderme tavlaması 550-650°C sıcaklığa kadar yavaş ısıtılıp, burada yaklaşık olarak 4 saat bekletilip ve yavaş soğutularak yapılır. Tavlama işlemi hiçbir zaman 723°C nin üzerine çıkmaz.

4.1.1.3. Yumuşatma

Çeliğin sertliğini azaltmak, talaş kaldırmayı iyileştirmek veya döküm ve dövme parçaların iç gerilmelerin azaltmak amacıyla yapılır. Ötektoid altı çelikler A_{C3} , ötektoid üstü çeliklerde A_{C1} eğrisinin üstünde belirli sıcaklığa kadar ısıtılıp, içyapı östenite dönüştükten sonra fırın içinde soğutma işlemidir. Ötektoid altı çelikler, A_{C3} çizgisinin en az 10°C üzerinde tavllanır ve yapıda ötektoid dışı ferrit ile kaba lamelli perlitten oluşan bir yapı oluşur. Ötektoid altı çelikler ise A_{C1} sıcaklığının en az 10°C üzerine tavllanır ve yapı kaba lamelli perlit alanı ile bunu çevreleyen ötektoid dışı sementitten oluşur. Yapıda sementitin bulunması talaş kaldırma işlemini zorlaştırır. Bu nedenle ötektoid üstü çeliklerde son işlem olarak yumuşatma tavlaması uygulanmaz. Tavlama süresi uzun olup, 5 saatin altında uygulanmaz.

4.1.1.4. İri tane tavlaması

Çoğunlukla az C'lu çeliklere talaş kaldırma özelliğini iyileştirmek için uygulanır. Malzeme birkaç saat süre ile A_{C3} sıcaklığının 150°C sıcaklığına kadar tavllanır ve yavaş olarak soğumaya bırakılır.

4.1.1.5. Difüzyon tavlaması

Çözünebilir bileşenlerin içyapı da düzenli bir şekilde dağılması amacıyla yapılır. Parça içerdiği C miktarına göre 1000-1300°C arasına kadar ısıtılır. Gerekli tedbirler alınmazsa tane büyümesi, dekarbürizasyon ve oksidasyon meydana gelebilir.

4.1.1.6. Küreselleştirme

Bu tavlamanın amacı, %0,5'ten çok C içeren çeliklere talaşlı imalat, haddeleme, bükme, çekme gibi şekillendirme işlemleri öncesinde en yumuşak ve sünek hali kazandırmaktır.

4.1.2. Sertleştirme

Sertleştirme işlemi, östenit derecesine kadar ısıtılan çeliğin bir müddet bekledikten sonra hızlı bir şekilde soğutulmasıdır. %C < 0,8 olan çeliklerin östenit soğuması sonucu meydana gelen faz değişimleri çok yavaş soğuma sonucu mümkün olan dönüşümlerdir. Atomlar yavaş soğuma sonucu meydana getirebildikleri kristal şekillerini hızlı soğuma olması durumunda oluşturamazlar. Soğuma hızlandırıldığından difüzyon zor olmaktadır. Sertleştirme ile soğutma hızını kritik soğutma hızından yüksek tutarak kristal şekilleri değiştirilir.

Sertleştirme işlemi için 3 aşama söz konusudur. Isıtma, bekletme ve soğutma.

4.1.2.1. Isıtma

Bu aşamada malzeme su verme sıcaklığına ısıtılmalıdır. Çelik malzemelerde sertleştirmek için ısıtılması gereken sıcaklıklar içerdikleri karbon oranına göre değişiklik göstermektedir.

Otektoidaltı çeliklerde; $T = A_{C3} + (30^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C})$

Otektoidüstü çeliklerde; $T = A_{C1} + (30^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C})$

4.1.2.2. Bekletme

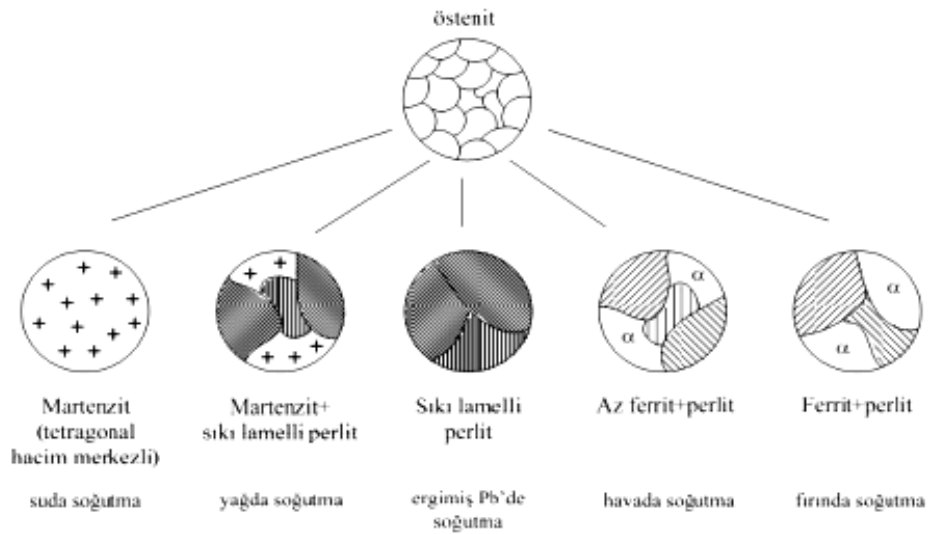
Tavlamanın uygun olabilmesi için çeliğin tamamen östenit halinde bulunması gereklidir. Bunun içinde belirli bir süre donuşum için o sıcaklıkta tutulmalıdır. Malzemenin iç kısımları dış kısımlarına göre daha geç faz dönüşümüne uğrarlar. Bu

yüzden çelik tavlama sıcaklığında bir müddet beklemelidir. Bu bekleme sayesinde malzemenin iç kısmı ile dış kısmı aynı yapıya gelecek yani çelik tamamen östenit faza dönüşecektir.

4.1.2.3. Soğutma

Çeliğin sertleşmesi için soğutma hızı, malzemenin kritik soğutma hızının üstünde olmalıdır.

Östenit, çeliğin bileşimine bağlı olarak, minimum bir hızın altına inilmeyecek şekilde soğutulur ve yarı kararlı tetragonal hacim merkezli martenzit yapısı oluşur. Diğer bir deyişle, çeliklerin mümkün olan en yüksek sertlik ve aşınma dayanımına sahip olması istendiğinde sertleştirme işlemi yapılır. Sertleştirme sonucunda soğuk şekil değiştirme kabiliyeti azalır, süneklik düşer. Bu işlem daha çok dönüşüm sertleşmesinde geçerlidir. Çelik fırın içerisinde çok yavaş soğutulduğunda birbirlerine yakın oranda ferrit ve perlit içeren bir yapıya dönüşür. Havada soğutmaya bırakılan çeliğin mikro yapısında ise perlit ve az oranda ferrit bulunur. Ergimiş kurşun ile yapılan daha hızlı soğutmada östenitten ferrite donuşum engellenir. Oda sıcaklığında ince sıkı lamelli perlitik bir yapı haline dönüşür. Yağda soğutulan çelikte perlit oluşumu engellenir. Çok sıkı lamelli perlit kristalleri ile martenzit yapısı oluşur. Suda soğutulan çeliğin yapısı ise tamamen martenzite dönüşmektedir. Çok hızlı bir soğuma olduğundan östenitin perlite donuşu tamamen engellenmiş olur [50].

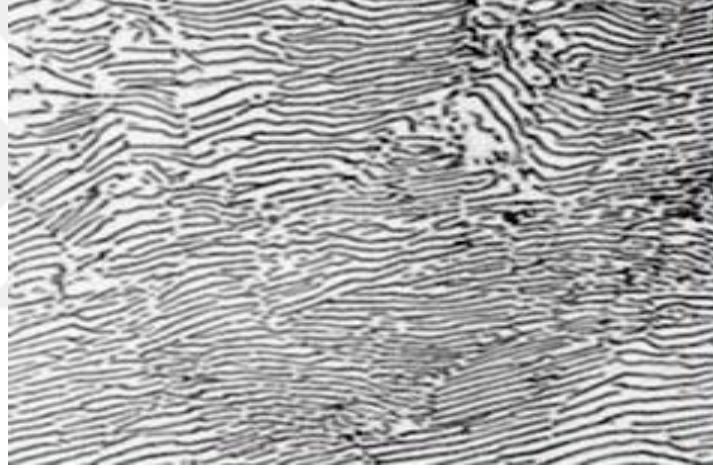


Şekil 4.1. Östenitin soğuma hızına bağlı olarak yaptığı dönüşümler

Hızlı soğuma sonucu elde edilen içyapı, büyük ölçüde dönüşüm sıcaklığına, yani karbonun ve diğer alaşım elementlerinin yayınmasına bağlıdır. Aşırı soğumuş östenit, üç temel sıcaklık kademesinde dönüşüme uğrar.

4.1.2.3.1. Perlit kademesinde dönüşüm

Bu dönüşüm, ferrit ve sementit lamellerinden oluşan bir içyapı oluşumu ile sonuçlanır. Soğuma hızı arttıkça karbon ve diğer alaşım elementlerinin yayınma süresi azalır. Sementit lamellerinin genişliği azalarak, ince veya çok ince lamelli perlitik bir içyapı meydana gelir. Lameller arası mesafe ne kadar kısa ise, içyapıda karbon dağılımı o kadar homojendir. Bu nedenle de sertlik ve dayanım değerleri artar.

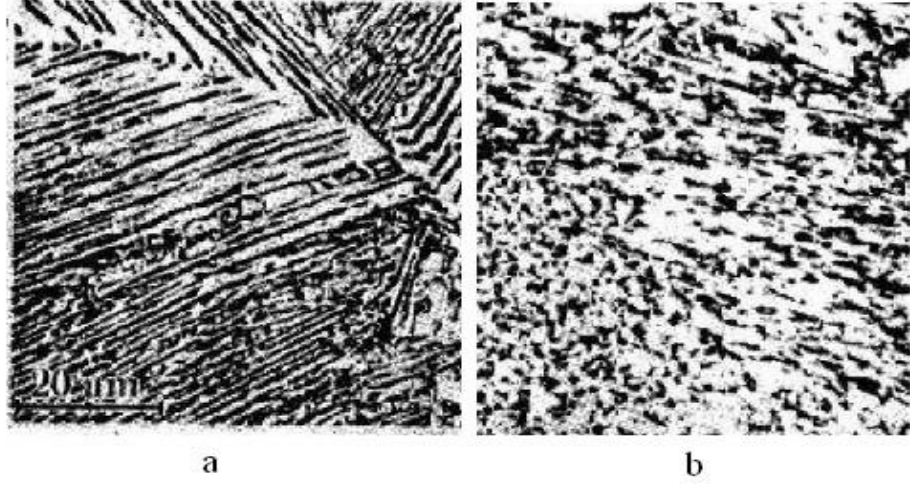


Şekil 4.2. Sertleştirme işlemi ile ortaya çıkan perlit yapı

4.1.2.3.2. Beynit kademesinde dönüşüm

Beynit kademe dönüşümünde, demir atomu yayılamaz, karbon atomu yayılması ise güçleşir. Beynit, elektron mikroskopunda iki şekilde görülebilir.

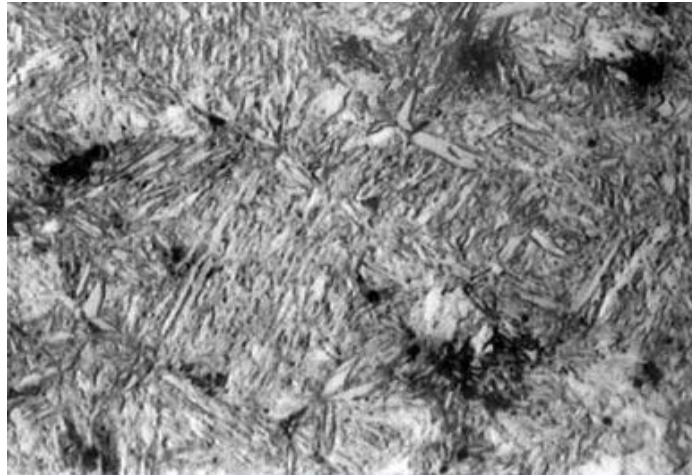
- İğneli beynit: Ferrit içerisine gömülmüş karbon parçacıkları olarak tanımlanır. Sürekli soğuma veya sabit sıcaklıkta (izotermik) dönüşüm ile elde edilir.
- Taneli beynit: Sürekli soğuma ile elde edilir. Soğuma hızına bağlı olarak iğneli beynit, kaba ve ince taneli beynit olarak ikiye ayrılır. İnce taneli beynit, Ms'nin hemen üzerindeki sıcaklıklarda oluşur.



Şekil 4.3. (a) İğneli ve (b) taneli beynit yapısı [51]

4.1.2.3.3. Martenzit kademesinde dönüşüm

Martenzit, hacim merkezli tetragonal (HMKT) yapıya sahip yarı dengeli bir fazdır. Martenzitik reaksiyonlarda da çekirdeklenme ve büyüme söz konusudur. Çekirdeklenme için aşılması gerekli enerji bariyeri oldukça yüksektir. Bu nedenle martenzitik reaksiyon için malzemeyi dengeli dönüşüm sıcaklığının çok çok altına ani olarak soğutmak gerekir. Martenzitin büyümesi ise oldukça kolaydır. Çeliklerdeki martenzitik dönüşüm östenit bölgesinden ani olarak martenzit oluşumun başladığı sıcaklığa kadar çelik soğutulur. Östenit fazında çözünen C, kristal kafesini terk edemeyip karbür yapamadığı için östenit içerisinde hapsolür. Bu sıcaklıkta HMK yapıya sahip olması gereken demir C atomlarının kafeste hapsolması nedeniyle kristal yapı parametreleri değişerek HMKT yapıya sahip olur.



Şekil 4.4. Sertleştirme işlemi ile ortaya çıkan martenzit yapısı

4.1.3. Islah etme

İstenen sertlik ve mekanik özelliklerin elde edilmesi amacıyla yapılan su verme ve menev işleme işlemidir. Özellikle parçanın tüm kesitinin sert olması istene durumlar için kullanılır.

4.1.3.1. Su verme

En basit şekilde, malzemenin sertleştirme sıcaklığına kadar ısıtılması ve ani olarak soğutulmasıyla sertleştirilmesi şeklinde tariflenebilir.

Sertleştirme sıcaklık aralıkları, maksimum sertliğin, en küçük tane yapısı ile elde edilmesini sağlayacak şekilde bir dizi deney ile belirlenen değerlerdir. Bu değerlerin altında veya üzerinde yapılacak ısıtma, sertlik değerinin düşük, nihai içyapının ise istenen şekilde olmaması ile sonuçlanacaktır. Ayrıca sertleştirme sıcaklığında tutma süresi önemli olup, malzemenin alaşım, az alaşım olması ve tane boyutlarının uygunluğu ile bağlantılıdır.

Su verme ortamının seçimi, malzemenin alaşım miktarıyla alakalıdır. Düşük alaşım çelikler için daha çok su ve tuz banyoları tercih edilirken, yüksek alaşım çelikler için çarpılma riski göz önünde bulundurularak yağ gibi yumuşak ortamlar tercih edilir. Yoğunlukla kullanılan soğutma ortamları; su, yağ, tuz banyosu ve hava şeklinde belirtilebilir.

4.1.3.1.1. Su ortamında sertleştirme

Suda sertleştirme endüstride kullanılan en etkili ve en yaygın sistemdir. Genel olarak su vererek sertleştirme başlangıcı, çeliğin her yanında eşit su verme sıcaklığına kadar erişmesiyle sağlanır. Böylece çelik içyapısının tamamen östenitten oluşması sağlanır. Bunun için çelik, demir-karbon diyagramındaki karbon miktarı $< 0,8$ 'den düşük bölgelerde A3 ve karbon miktarı % 0.8-2.0 olan bölgedeki A_{CM} (uygulamada A1) üzerindeki sıcaklıklarda tavlmalıdır. Bütün yapının östenitten oluşması ve perlitin tamamının östenite dönüşmesi için bu sıcaklık değerlerinde çelik bekletilir.

4.1.3.1.2. Yağ ortamında sertleştirme

Su ve sulu eriyikten sonra en çok kullanılan soğutma sıvısı yağdır. Genellikle mineral yağlar kullanılır. Yağda soğutma hızı suda soğutma hızından daha yavaştır. Yağın soğutma gücü suyun 1/3'ü kadardır. Yağda sertleştirmede daha az gerilmeler doğar ve buna bağlı olarak da çarpılma, çekme ve çatlama daha az olur. Yağın bu özelliği kritik soğuma hızı düşük olan düşük alaşımlı çeliklerin yağda sertleştirilmesini gerekli kılar.

4.1.3.1.3. Tuz banyosunda sertleştirme

Soğutma amacı için en yaygın olarak kullanılan tuz banyoları, genellikle yarı yarıya sodyum nitrat ve potasyum nitrat içerirler. Bunlar 160-500 °C arasında kullanılırlar. 500-600 °C arasında kullanılan tuz banyoları da mevcuttur. Bir tuz banyosu makul ölçüde iyi bir sertleşebilirliğe sahip bir çelik için ideal bir su verme ortamıdır. Kalın kesitli parçalar (büyük parçalar) için ise uygun değildir.

4.1.3.1.4. Havada sertleştirme

Genellikle ince kesitli az alaşımlı çelikler ve yüksek alaşımlı çelikler, basınçlı hava veya durgun hava ile sertleştirilebilirler. Hava ile soğutma hızı çok düşüktür ve iç gerilmelerden kaynaklanan çarpılmalar ihmal edilebilir düzeydedir. Hava genelde çok ani soğuması istenmeyen mamullerin fırın çıkışlarında kullanılır.

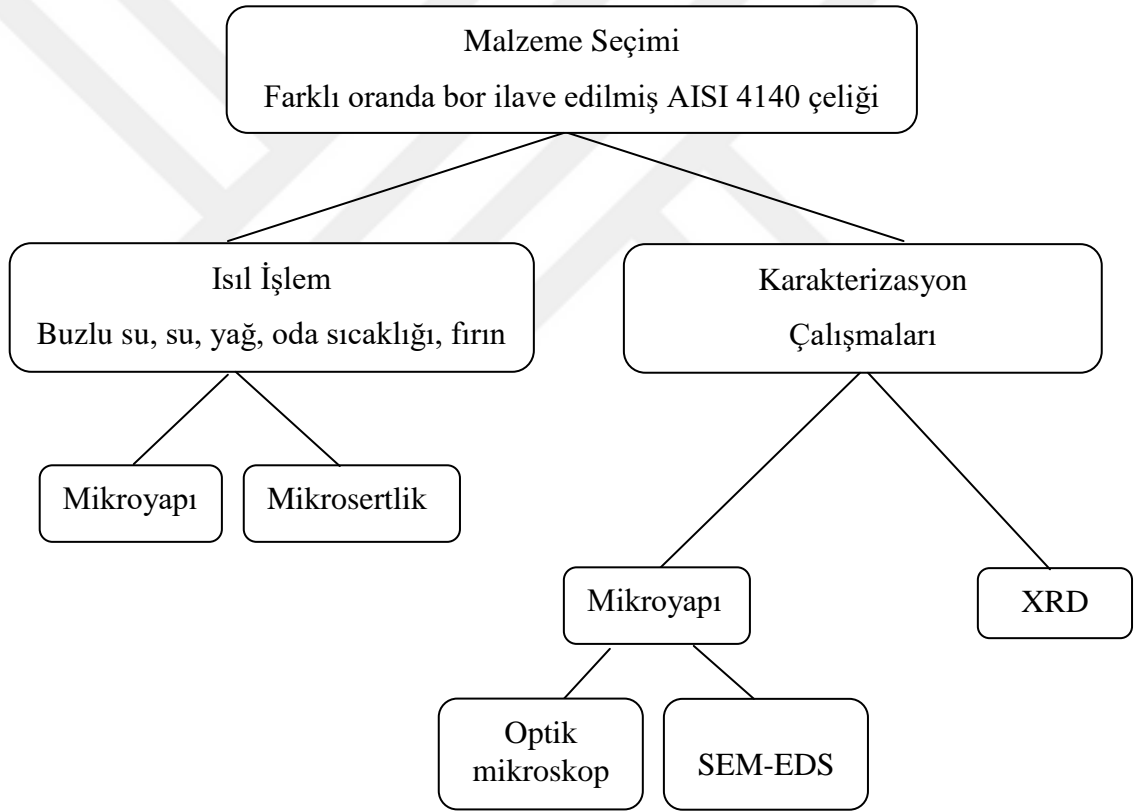
Havanın kullanılmasının avantajları, distirsiyonun ihmal edilebilir düzeye indirilmesi ve çeliğe soğuma sırasında doğrultma işleminin kolayca uygulanabilmesidir. Parça sabit basınçlı bir hava akımında döndürüldüğünde, düzenli bir şekilde soğuması gerekir. Havada soğumanın bir dezavantajı, soğuma sırasında yüzeyin oksitlenmesidir.

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Çalışma Sistematiği

Yapılan bu çalışmada, farklı oranda ilave edilmiş borlu AISI 4140 çeliğin ısıtılma ve karakterizasyon çalışmaları araştırılmıştır. Çalışmanın deneysel sürecinin şematik gösterimi Şekil 5.1. de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Deneysel çalışma sistematiğinin şematik gösterimi

5.2. Malzeme Seçimi

Türkiye de ve dünyada yaygın olarak kullanılan AISI 4140 çeliği seçilmiştir. AISI 4140 çeliği, otomobil, inşaat ve tarım makineleri parçaları, takım tezgâhları, uçak parçaları, dingil, krank mili ve dişli gibi çok sayıda alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Değerlendirilmiş olan farklı oranda borlu AISI 4140 çeliğinin kimyasal analizi Tablo 5.1. de verilmiştir.

Tablo 5.1. Asil Çelik A.Ş./Bursa tarafından verilen numunenin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Malzeme	Kodu	C	Si	Mn	P	S	Ti	Al	B	Cr	Mo
4140	11	0.44	0.182	0.838	0.013	0.007	0.0279	0.0662	0.0002	0.88	0.162
4140	12	0.44	0.186	0.846	0.015	0.009	0.0252	0.0682	0.0011	0.89	0.175
4140	13	0.44	0.18	0.822	0.014	0.007	0.021	0.0712	0.0017	0.88	0.163
4140	14	0.44	0.173	0.796	0.011	0.004	0.0196	0.0623	0.0026	0.86	0.164
4140	15	0.45	0.17	0.79	0.014	0.007	0.0173	0.063	0.0032	0.87	0.168
4140	16	0.44	0.156	0.765	0.013	0.007	0.014	0.0463	0.0038	0.88	0.171

5.3. Isıl İşlem Aşamaları

Dökümü ve haddeleme işlemi yapılmış olan numuneler uygun ebatlar da kesilmiş ve sertleştirme işlemi için ısıl işlem fırınına yerleştirilmiştir. Isıl işlemler, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarı'nda bulunan *Carbolite CWF 1200* markalı (Şekil 5.2.) ısıl işlem fırınında yapılmıştır.



Şekil 5.2. Isıl işlem fırını

Isıl işlem, demir-karbon denge diyagramından 850 °C olarak belirlendi ve ayarlanan sıcaklığa geldiğinde numuneler 25 dakika fırında bekletilmiştir. Altı adet farklı oranlarda bor ilavesi yapılmış çeliklerin her biri buzlu su, su, yağ, oda sıcaklığı ve fırın olmak üzere beş farklı ortamda ısıl işlem uygulanmıştır.

5.4. Metalografik İşlemler

5.4.1. Numunelerin kesilmesi

Numuneler, karakterizasyon çalışmaları ve ısıl işlem öncesinde mikroyapı incelemesi ve mikrosertlik testi açısından kolaylık sağlaması için bakalite uyacak ebatlarda kesilmiştir. Kesim işlemi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarı'nda bulunan *Metkon Metacut 250* (Şekil 5.3.) markalı kesme cihazında yapılmıştır.



Şekil 5.3. Hassas kesme cihazı

5.4.2. Bakalite alma

Hassas kesme cihazında kesildikten sonra ısıl işlem görmüş ve görmemiş numuneler incelemelerin kolaylığı için Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 5.4. de verilen *Metkon Ecopress 50* markalı otomatik bakalite alma cihazında bakalite alınmıştır.



Şekil 5.4. Otomatik bakalite alma cihazı

5.4.3. Numunelerin zımparalanması ve parlatılması

Zımparalama ve parlatma işlemleri Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarı'nda bulunan *Mikrotest Multipol Advanced* (Şekil 5.5.) tipi otomatik zımparalama-parlatma cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 5.5. Zımparalama-parlatma cihazı

Dönüş hızı ve baskı basınç değeri ayarlanabilen otomatik zımparalama-parlatma cihazında zımparalama aşamasında 1.5 bar, parlatma aşamasında ise 0.6 bar'lık basınç uygulanmıştır. Numunelerin zımparalanması HV150 den daha sert bütün materyalleri hassas ve düz zımparalayan Şekil 5.6. da verilen *Aka- Piatto* adı verilen zımparalama diski ile yapılmıştır.



Şekil 5.6. Numuneleri zımparalamada kullanılan diskler

Zımparalama işleminde numunenin hem ısınmasını engellemek hem de homojen bir temas sağlamak için cihazın su modu açılarak numunelere sulu zımparalama yapılmıştır. Fotoğraf çekmede odaklama kolaylığı sağlamak için zımparalamanın düzgün ve itinalı yapılması gerekir. Bu nedenle zımparalama aşamasından sonra numune yüzeyinin düz ve derin çiziklerin giderilmiş olmasına dikkat edilmiştir.

Parlatılacak numuneye uygun parlatma kumaşları takılmış ve ilk olarak *Aka- Allegran* parlatma diskinde *DiaMaxx Mono 9 µm* elmas süspansiyon, ikinci aşama da ise *DiaDouble Mono 1 µm* süspansiyon ile 420 s. süreyle parlatılmıştır.

5.4.4. Numunelerin dağlanması

Zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra numune yüzeyi pürüzsüz hale getirildikten sonra mikroyapı incelemesi için yüzeyde kontrast oluşturmak gerekir. Dağlama işlemi yapıldıktan sonra mikroyapı karakteristikleri açığa çıkar. Bu çalışma da, metalografi de, elektrolitik ve kimyasal dağlama çeşitlerinden kimyasal dağlama işlemi

uygulanmıştır. % 3'lük nital çözeltisi hazırlanarak işlem görmemiş numuneler 15 s., işlem görmüş numuneler ise buzlu su da 30 s., su da 25 s., yağ da 20 s., oda sıcaklığın da 15 s. ve fırın da 10 s. dağlanmıştır.

5.5. Optik Mikroskop ile İnceleme

Metalografik işlemler gördükten sonra dağlanan numuneler mikroyapı incelemesi için Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Mikroskopi Laboratuvarı'nda farklı büyüklükte objektifleri olan bilgisayar bağlantılı *Clemex* tipi dijital kamera monte edilmiş *Nikon Eclipse MA 100* tipi ışık mikroskobundan oluşan görüntü sistemiyle çekilmiştir. Çalışma da yer alan mikroyapıların fotoğrafları 50X büyütme ile çekilmiştir. Görüntü sisteminin fotoğrafı Şekil 5.7.'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Optik mikroskop ve görüntü sistemi

5.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

İşlem görmemiş borsuz (2ppm) ve 26 ppm bor içeren çelikler metalografik işlemlere tabi tutulmuş ve uygun dağlayıcılarla (% 3'lük nital çözeltisi) dağlanmıştır. Üretilen numunelerin mikroyapı fotoğrafları taramalı elektron mikroskobuyla (*SEM*) çekilmiştir.

Numunelerin *SEM* fotoğraflarının çekilmesinde Gebze TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'nde bulunan *Cambridge S4-10 Stereoscan* marka bilgisayar kontrollü dijital taramalı elektron mikroskobu (*SEM*) kullanılmıştır. *SEM* ile fotoğraf çekimine

geçmeden önce, parlatılmış ve dağlanmış olan numuneler, kaplama ünitesine yerleştirilmiş ve kaplanarak vakum altına alınmıştır. Kaplama malzemesi olarak altın-paladyum, altın, platin, karbon fiber, karbon rod, kırık yüzey, toz tercih edilmektedir. Buradaki amaç, elektron demetinin yüzeyden daha iyi saçılması ve görüntünün daha iyi kontrast ve netliğe sahip olmasıdır.

SEM fotoğraflarında belirginleşen her bir fazın kimyasal bileşim analizleri cihaza dâhil olan *Ortec 6230 EDS* (Enerji Dağılım Spektrometresi) marka sistem ile yapılmıştır. *SEM-EDS* tekniği ile malzemenin elementel bileşimini karakterize etmek için, elektron demeti tarafından bombardıman edilen numuneden yayılan X-ışınları kullanılarak yaklaşık 1 μ m kadar küçük yüzeyler ya da fazlar yarı-kantitatif olarak analiz edilebilir. *EDS* ile nokta, çizgi analizleri yanı sıra elementel haritalama mümkündür.



Şekil 5.8. Taramalı elektron mikroskobunun (SEM) fotoğrafı

5.7. X-Işını Kırınımı (XRD)

X-Işını Kırınım yöntemi (*XRD*), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması temeline dayanır. Her bir kristal faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. Çalışmada ki numunelerin içerdiği elementlerin tayini Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Bilim-Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde

(BTUAM) bulunan masaüstü *Rigaku Miniflex 600 X-Işını Difraktometresi*'nde (Şekil 5.9.) yapılmıştır.



Şekil 5.9. X-Işını kırınımı cihazı

5.8. Mikrosertlik testi

Numunelerin mikroyapı fotoğrafları optik görüntü sistemiyle çekildikten sonra mikrosertlik ölçümlerine geçilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Mikroskopi Laboratuvarı'nda *Future Tech FM-700* model dijital sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Vickers sertlik ölçümünde, yüzeyleri arasında 136° açı bulunan bir elmas piramit uç kullanılır. Uygulanan yük 10 g ile 1000 g arasında değişmektedir. Uç, numuneye belli bir kuvveti 5-30 saniye kadar uygulayarak, numune üzerinde kare şeklinde iz oluşturarak izin köşegen boyutları (d), cihaz mikroskobundan okunarak belirlenir. % 5 hassasiyette ölçüm alabilen ve elektronik olarak sertlik değerini kendisi hesaplayabilen bir cihazdır. Darbelere karşı daha hassas olduğundan en sert malzemeler bile bu metotla kolaylıkla ölçülebilir.



Şekil 5.10. Mikrosertlik ölçüm cihazı

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR

6.1. Karakterizasyon Çalışmaları

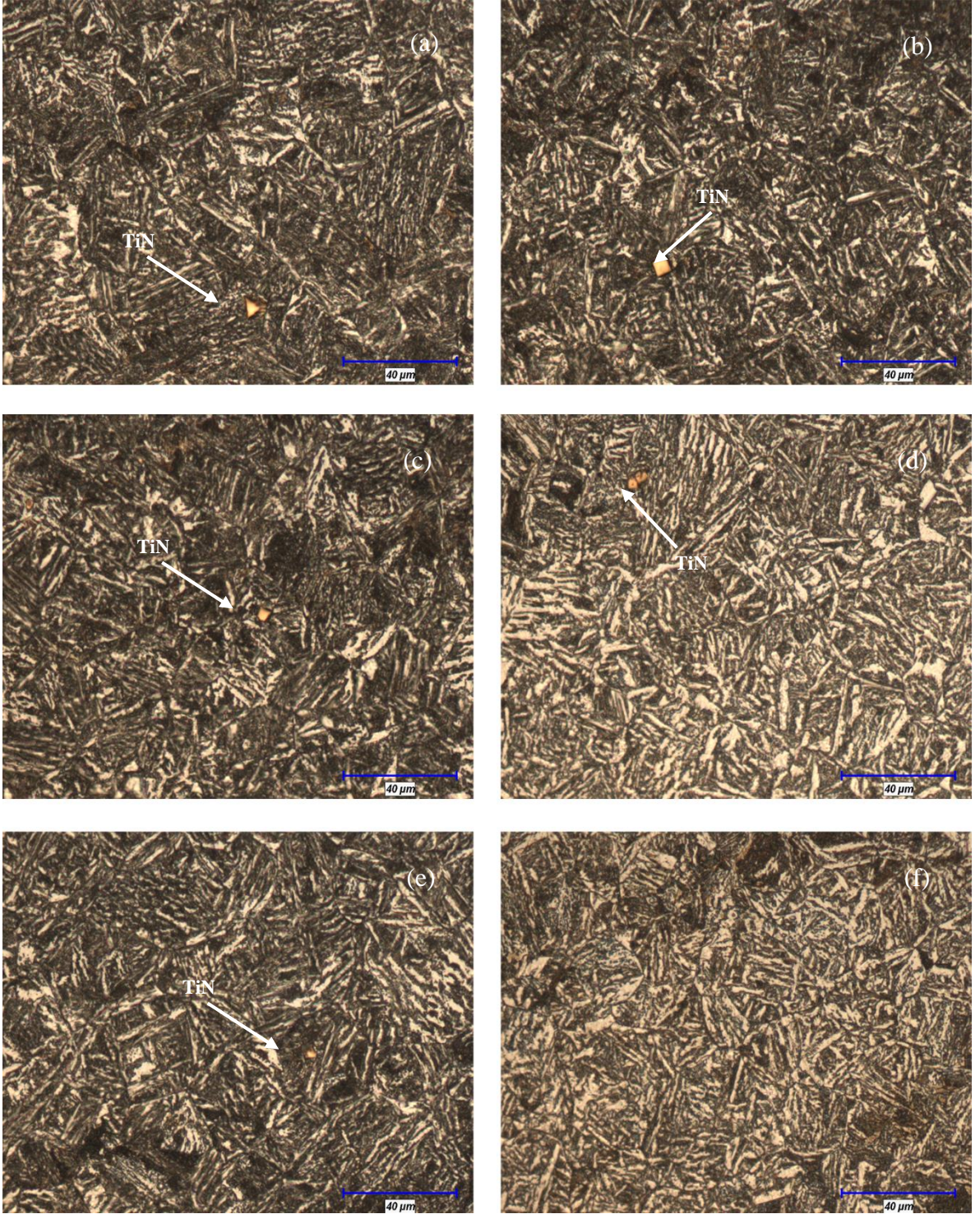
6.1.1. Mikroyapı incelemeleri

6.1.1.1. Optik mikroyapı sonuçları ve tartışma

Malzemelerin mikroyapısı, numunelerin farklı bölgelerinde optik mikroskop ile gözlemlenmiştir. Farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliğinin optik mikroyapı görüntüleri Şekil 6.1. de verilmiştir.

Mikroyapı görüntülerinde ince perlit+ferrit+kısmen üst beynit yapısının olduğu düşünülmektedir. Kesti, E. 2009'da yüksek lisans tezinde Ç 4140 çeliğinin mikroyapısında ferrit+perlit fazı olduğu sonucuna varmıştır [50].

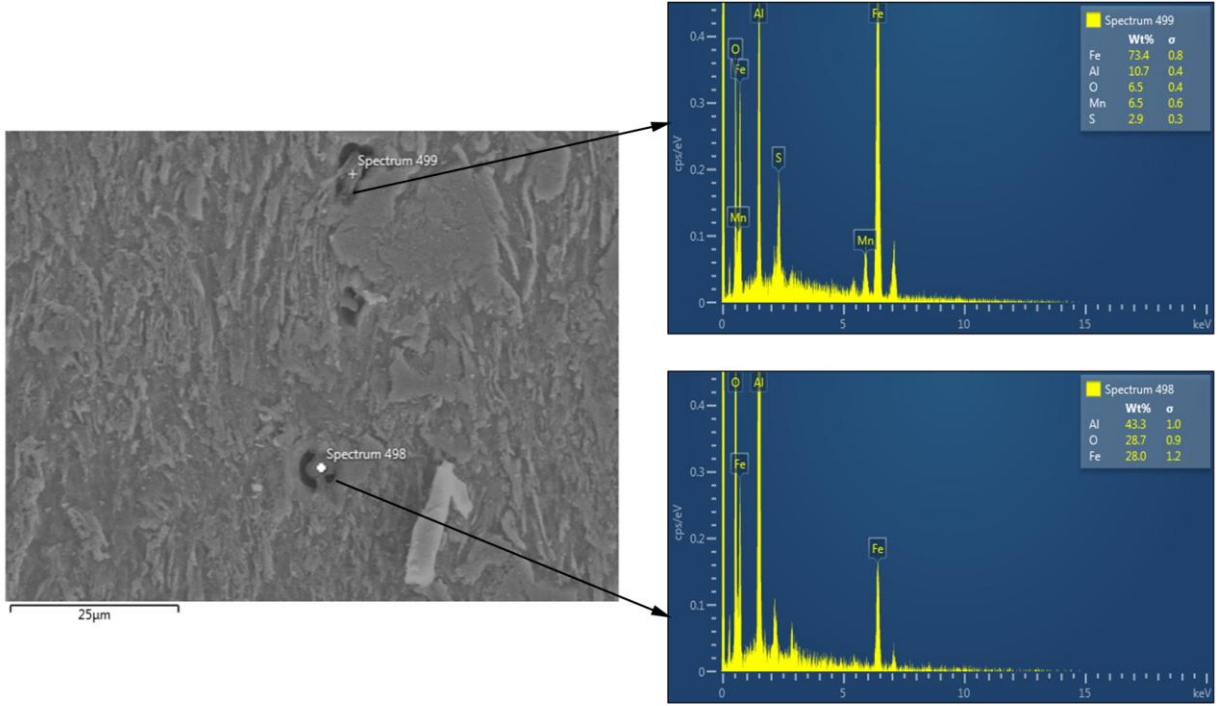
AISI 4140 çeliğine farklı oranlarda bor ilavesinin mikroyapılarda belirgin bir değişiklik oluşturduğu gözlenmemiştir. Bununla birlikte, ilave edilen bor oranının ppm seviyelerinde olduğundan kaynaklandığı düşünülmüştür. Ayrıca, elde edilen optik mikroyapılarda 3-6 µ boyutların da TN (Titanyum Nitrür) gözlenmiştir. Bu durum azotun borla bileşik oluşturmasının engellenerek titanyum ile bileşik oluşturduğunun kanıtıdır.



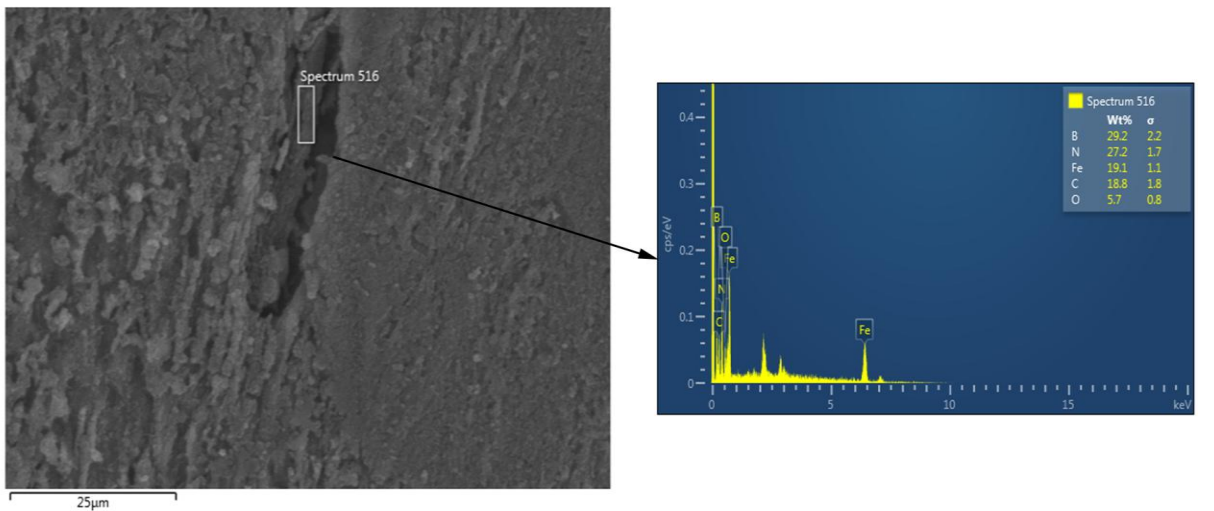
Şekil 6.1. Farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliğinin optik mikroyapıları (a) 2 ppm, (b) 11 ppm, (c) 17 ppm, (d) 26 ppm, (e) 32 ppm, (f) 38 ppm

6.1.1.2. SEM-EDS sonuçları ve tartışma

Farklı oranlarda bor ilavesi yapılmış AISI 4140 çeliğin SEM cihazında EDS dedektörü kullanılarak mikroyapı incelemesi sonucunda borsuz (2 ppm) ve 26 ppm bor ilaveli numunelerde mikroyapılar ve noktasal analizler değerlendirilmiştir. Borsuz (2 ppm) numunelerin mikroyapısında gözlenen noktaların görüntüleri Şekil 6.2. de verilmiştir.



Şekil 6.2. Borsuz (2 ppm) numunelerin SEM görüntüsü ve noktasal analizleri

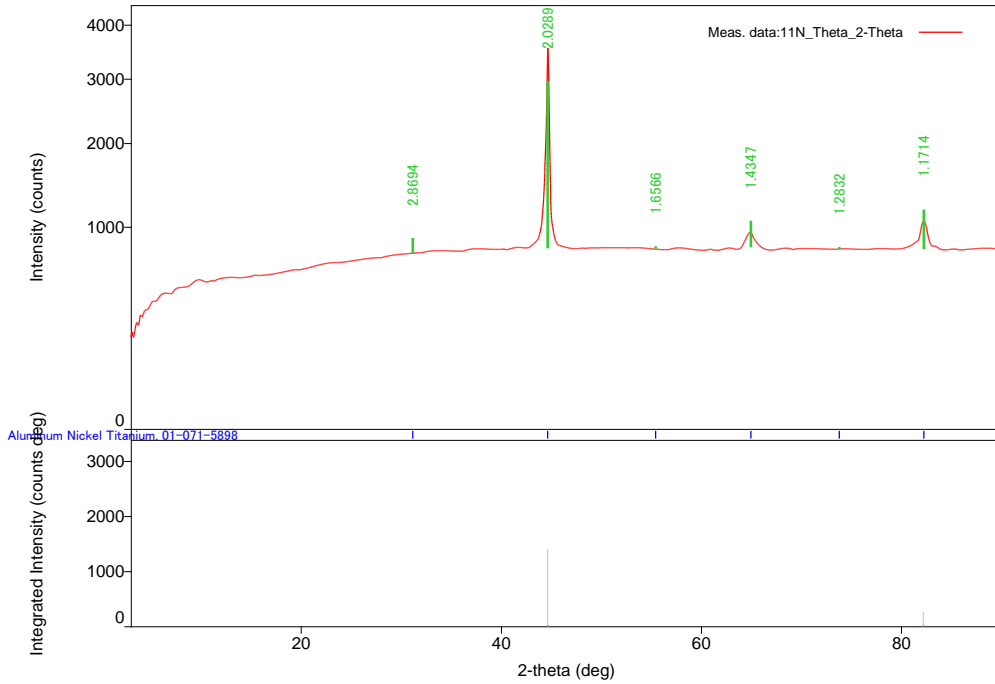


Şekil 6.3. 26 ppm bor içeren numunelerin SEM görüntüsü ve noktasal analizleri

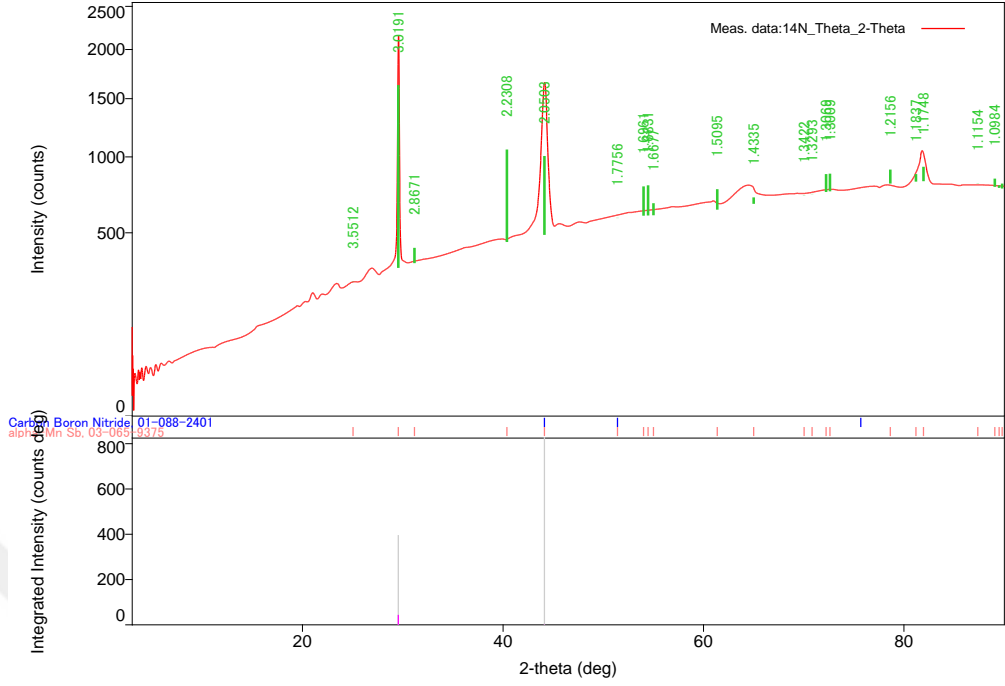
26 ppm bor içeren numunelerin SEM ile yapılan noktasal analizlerinde Spectrum 516 da (Şekil 6.3.) BN parçacıklarına rastlanmıştır. Döküm işleminin açık ortamda yapılması ve borun azota karşı affinitesinin yüksek olması sebebi ile BN oluşumları kaçınılmazdır. Fountain, R. W. Ve arkadaşları [52], demir içerisinde azotun çözünebilirliği üzerine borun etkisini incelemişler ve bor ile azot birleşerek bor nitrür oluşturduğunu gözlemlemişlerdir.

6.1.2. XRD analiz sonuçları ve tartışma

Malzemelerin içyapısının morfolojik özelliklerinin tanımlanması için X-ışınları analizleri borsuz ve 26 ppm bor içeren numuneler üzerinde XRD incelemeleri yapılmıştır.



Şekil 6.4. Borsuz AISI 4140 çeliğinin XRD grafiği



Şekil 6.5. 26 ppm bor içeren AISI 4140 çeliğinin XRD grafiği

Şekil 6.4. de borsuz AISI 4140 çeliğinin XRD grafiğinde belirgin bir pik görülmüştür. Bu pik değerinin alüminyum nikel titanyum ($Al_{0.5}Ti_{0.5}$) Ni piki olduğu gözlenmiştir. Şekil 6.5. de ise 26 ppm bor içeren çeliğin XRD grafiğinde belirgin iki pik görülmüştür. Şiddetli pikin carbon boron nitrit, ikinci yüksek şiddetteki pikin ise alpha- Mn Sb piki olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan XRD çalışmasında BN pikine rastlanması SEM ile yapılan çalışmayı desteklemektedir.

6.2. Isıl İşlem

6.2.1. Optik mikroyapı sonuçları ve tartışma

850 °C de 25 dakika bekletildikten sonra borsuz, 11, 17, 26, 32 ve 38 ppm bor içeren AISI 4140 çeliğine buzlu su, su, yağ, oda sıcaklığı ve fırın olmak üzere beş farklı ortamda ısıl işlem uygulanmıştır.

Buzlu su ile yapılan ısıl işlem sonucunda elde edilen mikroyapı görüntülerinde (Şekil 6.6) beynit+martenzit görüldüğü düşünülmektedir. Yapı oluşumları rastgele yönlenmelerden oluşmaktadır.

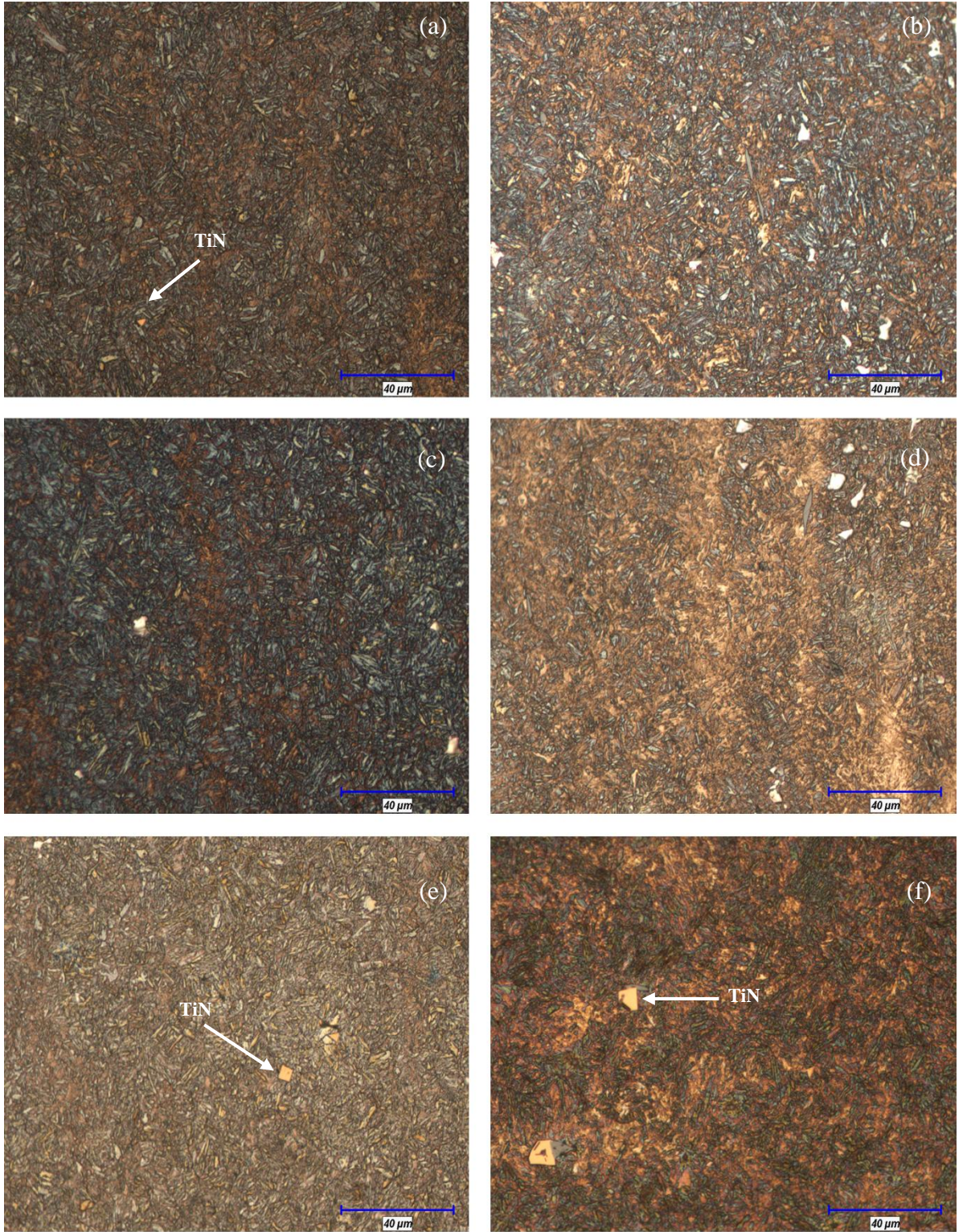
Su ile yapılan ısıtıl işlem sonucunda elde edilen mikroyapı görüntülerinde (Şekil 6.7) üst beynit+martenzit görüldüğü düşünölmektedir. Yapı oluşumları rastgele yönlennmelerden oluşmaktadır.

Yağ ile yapılan ısıtıl işlem sonucunda elde edilen mikroyapı görüntülerinde (Şekil 6.8) ince perlit+ferrit görüldüğü düşünölmektedir. Yapı oluşumları yine rastgele yönlennmelerden oluşmaktadır.

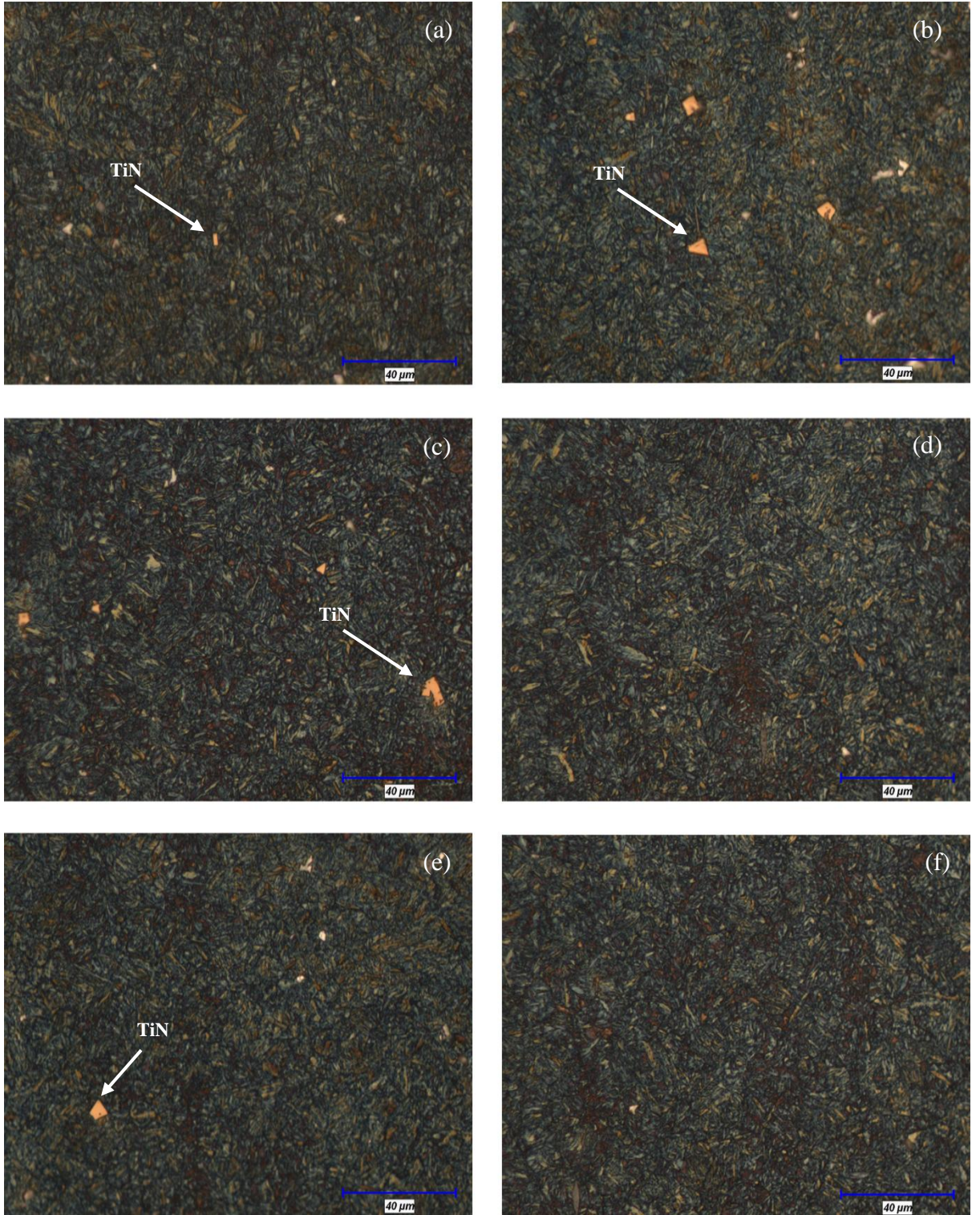
Oda sıcaklığında (havada) yapılan ısıtıl işlem sonucunda elde edilen mikroyapı görüntülerinde (Şekil 6.9) perlit+ferrit ve özellikle Şekil 6.9. (a) da az miktarda ok ile gösterilen kısımlarda martenzit görüldüğü düşünölmektedir. Yapı oluşumları yine rastgele yönlennmelerden oluşmaktadır

Fırın içerisinde yapılan soğutmada bor ilaveli çeliklerin optik görüntüleri Şekil 6.10. da verilmiştir. Yapılarda genel olarak belirgin bir şekilde koyu renkte olan tanelerin perlit olduğu, açık renkte olan tanelerin ise ferrit olduğu gözlenmiştir. Tane boyutları diğer ısıtıl işlem ortamlarında elde edilen yapılara göre çok belirgindir. Tane yapılarında yine herhangi bir yönlennme görölmemiştir. Yapı içerisinde yer yer sütunlaşma denilen mikroyapı hataları gözlenmiştir.

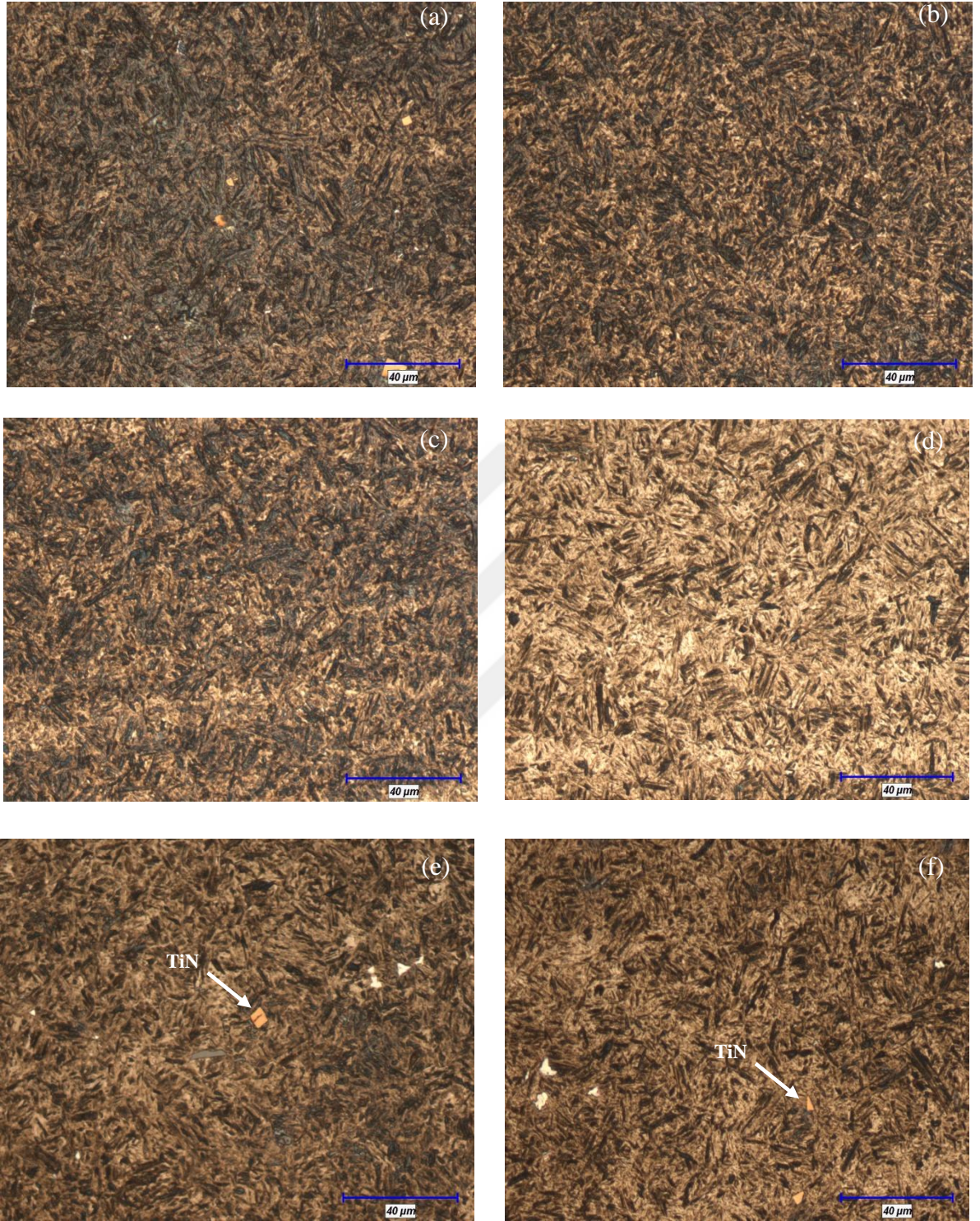
Genel olarak yapılan farklı ortamlarda ısıtıl işlemler sonucunda elde edilen mikroyapıları farklı bor oranlarına göre kıyasladığımızda belirgin bir fark görölmemiştir. Bunun sebebi ppm mertebesinde ilave edilen bor miktarından kaynaklanmıştır. Ayrıca farklı boyutlar da hemen hemen bütün numunelerde turuncu renkte köşeli TiN (Titanyum Nitrür) parçacıkları görölmüştür.



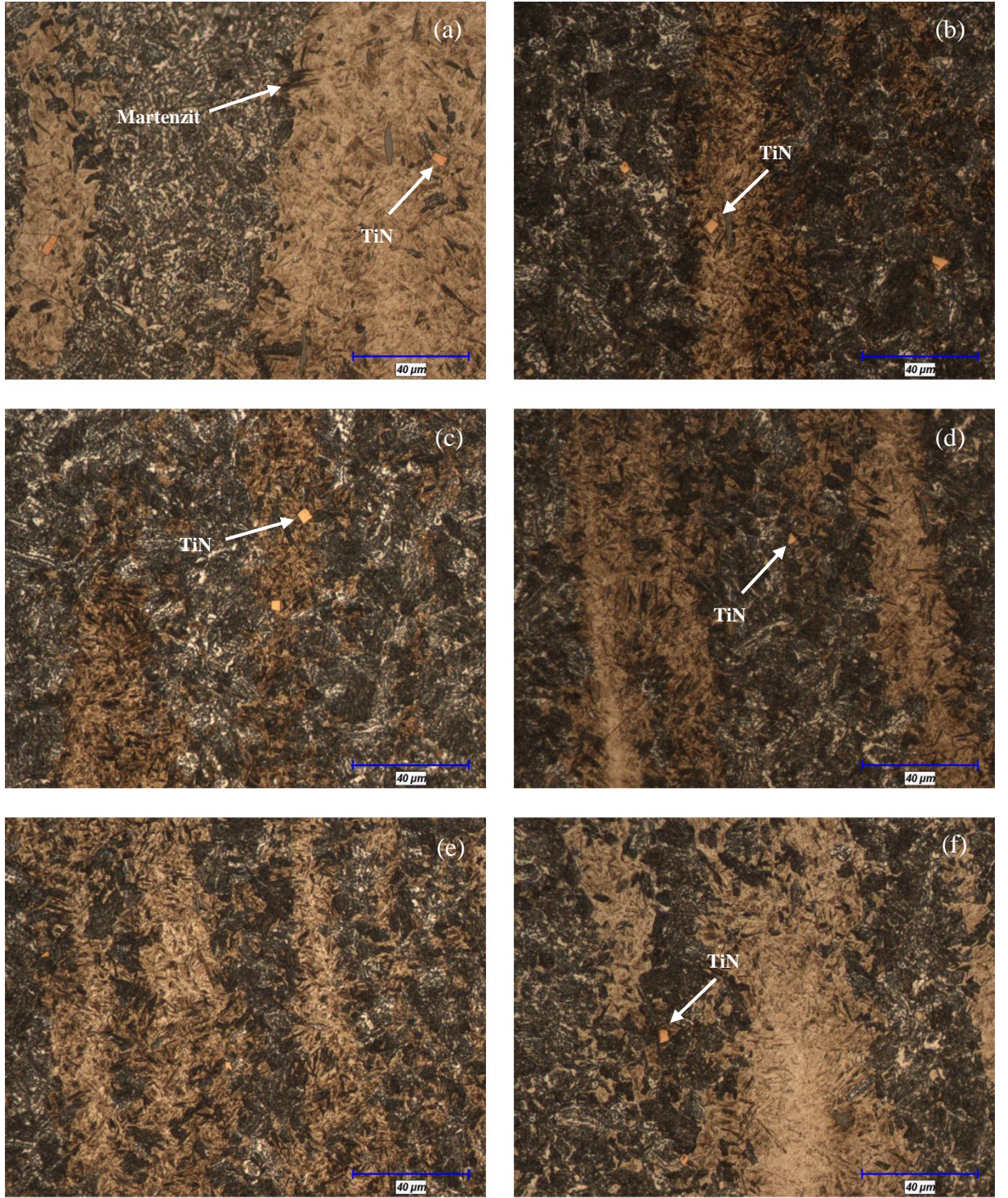
Şekil 6.6. Buzlu su da soğutulmuş farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliklerinin mikroyapıları (a) 2 ppm, (b) 11 ppm, (c) 17 ppm, (d) 26 ppm, (e) 32 ppm, (f) 38 ppm



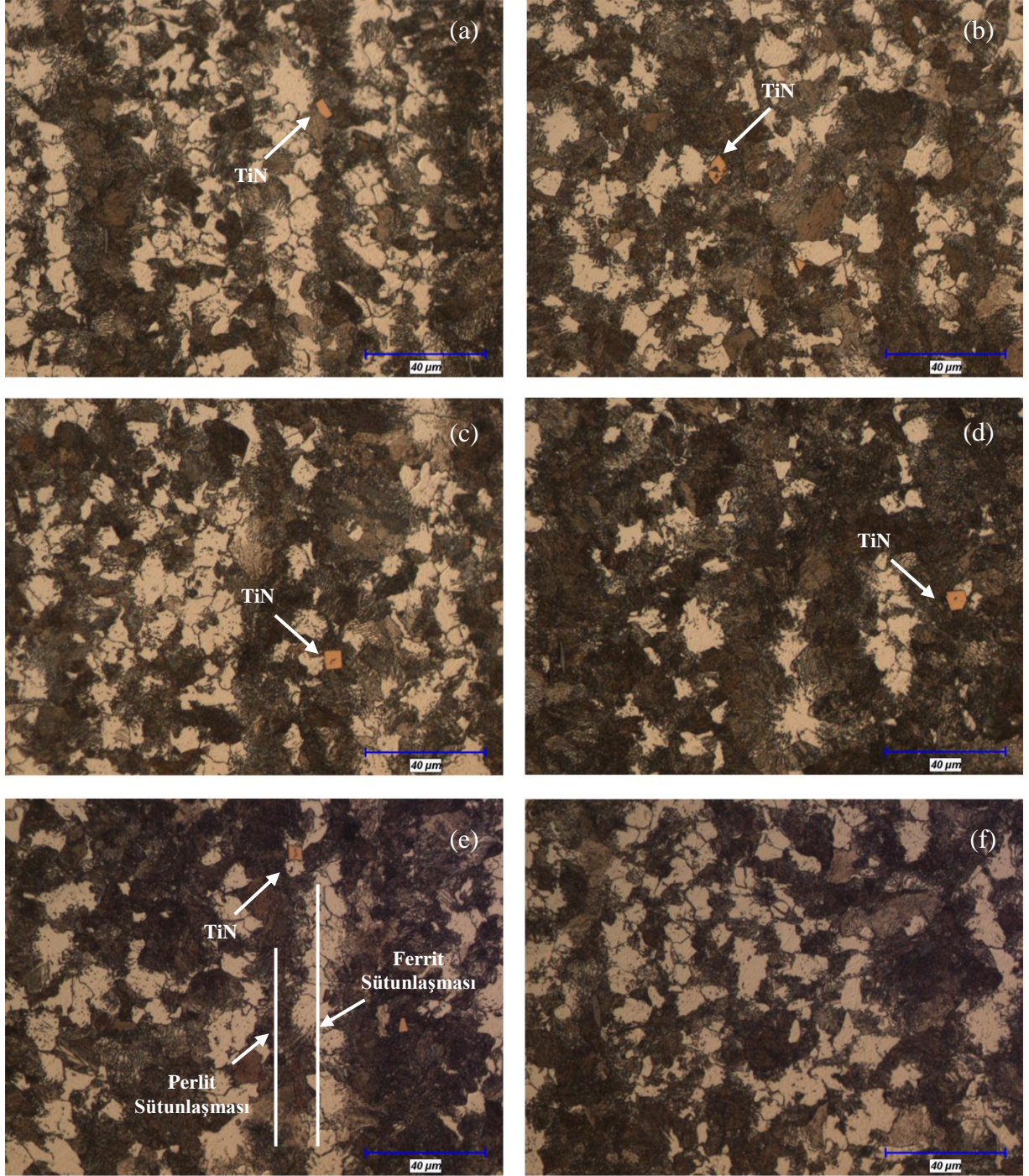
Şekil 6.7. Suda soğutulmuş farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliklerinin mikroyapıları
(a) 2 ppm, (b) 11 ppm, (c) 17 ppm, (d) 26 ppm, (e) 32 ppm, (f) 38 ppm



Şekil 6.8. Yağda soğutulmuş farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliklerinin mikroyapıları
(a) 2 ppm, (b) 11 ppm, (c) 17 ppm, (d) 26 ppm, (e) 32 ppm, (f) 38 ppm



Şekil 6.9. Oda sıcaklığında soğutulmuş farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliklerinin mikroyapıları (a) 2 ppm, (b) 11 ppm, (c) 17 ppm, (d) 26 ppm, (e) 32 ppm, (f) 38 ppm



Şekil 6.10. Fırın da soğutulmuş farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliklerinin mikroyapıları (a) 2 ppm, (b) 11 ppm, (c) 17 ppm, (d) 26 ppm, (e) 32 ppm, (f) 38 ppm

6.2.2. Mikrosertlik sonuçları

Farklı oranda bor içeren AISI4140 çeliğın buzlu suda, suda, yağda, havada ve fırında ısıl işlem uygulamaları sonucunda elde edilen mikrosertlik değeri Tablo 6.1. de verilmiştir. Numunelere 100 g.'lık yük altında 10 s. süreyle, 8 ayrı ölçüm yapılmıştır.

Tablo 6.1. Farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliğının buzlu suda, suda, yağda, havada ve fırında soğutulması sonucunda elde edilen mikrosertlik değeri

Numune No	Bor Oranı ppm (%)	Buz (HV)	Su (HV)	Yağ (HV)	Oda Sıcaklığı (HV)	Fırın (HV)
11	2	633.86	603.45	573.80	475.34	223.85
12	11	673.98	607.58	409.35	355.16	238.94
13	17	690.43	671.23	561.35	341.65	227.14
14	26	706.25	646.87	431.74	367.99	234.38
15	32	598.46	593.70	446.85	395.25	244.20
16	38	641.49	582.80	432.76	396.88	204.93

Farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliğının buzlu suda, suda, yağda, havada ve fırında soğutulması sonucunda ortama göre olması gereken sertlik değeri oluşmuştur. Buzlu su ve su da yapılan ısıl işlemler neticesinde optimum değeri olan 15-25 ppm bor içeren numunelerde mikrosertlik değeri artışı olduğu gözlenmiştir.

BÖLÜM 7

SONUÇ-TARTIŞMA ve ÖNERİLER

Farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliğinin ısıtma işlem görmüş ve ısıtma işlem görmemiş numuneleri üzerinde özellikle mikroyapısal incelemeler yapılmış ve sonuçlar aşağıda belirtilmiştir;

1) Isıtma işlem görmemiş numunelerde mikroyapı görüntülerinde ince perlit+ferrit+kısmen üst beyrit yapısının olduğu düşünülmektedir. Isıtma işlem görmemiş numunelerde farklı oranlarda bor ilavesinin mikroyapılarda belirgin bir değişiklik oluşturduğu gözlenmemiştir.

2) Borsuz (2 ppm) ve 26 ppm bor içeren numunelere SEM ile noktasal analizler yapılmıştır. 26 ppm bor içeren numunelerde BN parçacıklarına rastlanmıştır.

3) Borsuz AISI 4140 çeliğin XRD grafiklerinde alüminyum nikel titanyum ($Al_{0,5}Ti_{0,5}$) Ni piki gözlenmiştir. 26 ppm bor içeren çeliğin XRD grafiğinde ise carbon boron nitrit ve alpha- Mn Sb piki olduğu görülmüştür.

4) Borsuz, 11, 17, 26, 32 ve 38 ppm bor içeren AISI 4140 çeliğinin buzlu su, su, yağ, oda sıcaklığı ve fırın olmak üzere beş farklı ortamda ısıtma işlem uygulanmıştır. Buzlu su ile yapılan ısıtma işlem sonucunda beyrit+martenzit, su ile yapılan ısıtma işlem sonucunda üst beyrit+martenzit, yağ ile yapılan ısıtma işlem sonucunda ince perlit+ferrit, oda sıcaklığında (havada) yapılan ısıtma işlem sonucunda perlit+ferrit ve fırında yapılan soğutmada belirgin bir şekilde koyu renkte olan tanelerin perlit olduğu, açık renkte olan tanelerin ise ferrit olduğu gözlenmiştir. Ayrıca farklı boyutlar da hemen hemen bütün numunelerde turuncu renkte köşeli TiN (Titanyum Nitrür) parçacıkları görülmüştür.

5) Farklı oranlarda bor içeren AISI 4140 çeliğinin buzlu suda, suda, yağda, havada ve fırında soğutulması sonucunda sertlik değerlerinde özellikle buzlu su ve su da yapılan ısıtma işlemler neticesinde optimum değer olan 15-25 ppm bor içeren numunelerde mikrosertlik değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir.

Yapılan optik ve SEM çalışmaları ppm mertebesinde borun yaptığı etkiyi göstermek için yeterli değildir. Daha hassas olan EPMA gibi cihazlarda incelenmesi gerekir.

Aşınma çalışmaları da dâhil olmak üzere optik görüntüler ve SEM çalışmalarıyla borun etkisini belirlemek zordur.



KAYNAKLAR

1. Paju, M., Hougardy, H. P., Grabke, H.J., “Effects of boron alloying on the properties of a low-carbon low-alloying steel”, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 18, s. 235-242, 1989.
2. Angın, M. H., “Ferrobor Fizibilite Raporu”, *Eti Holding*, s. 3-26, Ankara, 2003.
3. Pazarlıoğlu, S., “Çeliklerin niobyum borür kaplanması ve özellikleri”, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya, 2006.
4. Subaşı, M. ve Karataş, Ç., “AISI 4140 Çeliğinde Sertlik, Yorulma Dayanımı İlişkisi”, *KSU Journal of Engineering Sciences*, 13(1), 2010.
5. Çarboğa, C., “Düşük karbonlu çeliklere bor ilavesinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Doktora tezi*, Ankara, 2010.
6. Ölmez E., “Paslanmaz çelik üretiminde Al-Ti-B alaşımının mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkisinin araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2014.
7. Höke, G., Şahin i., Çinici, H. ve Fındık, T., “Kriyojenik İşlemin SAE 4140 Çeliğin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi”, *Journal of Technical-Online*, vol. 13, number 2, 2014.
8. Rautaruukki Corporation, P.O. Box 138, FI-00811 Helsinki, Finland.
9. Frydman S., Konat Ł., Łętkowska B., Pękalski G., “Impact resistance and fractography of low-alloy martensitic steels”, *Arch. of Foundry Eng., spec. iss. 1*, vol. 8, s. 89-94, 2008.
10. Masakatsu, U., “Hardenability of Low-Carbon Steel And Boron”, *Research Review on Boron in Steels and Targets for Next Century*, s. 78-86, Tokyo, 1999.
11. Tomoya, F., “Hardenability improvement effect of the boron in TMCP, *Research Review on Boron in Steels and Targets for Next Century*”, s. 68-72, 1999.
12. Fountain, R. W., Chipman J., “Solubility and precipitation of boron nitride in iron-boron alloys”, *Transactions of the metallurgical society of AIME*, 224, s. 599-605, 1962.
13. Deardo, A. J., “New developments in the alloy design of microalloyed and other modern HSLA steels”, *Metals&Materials*, 1992.

14. Korchynsky, M., “A new role for micro-alloyed steels-adding economic value”, *Consultant in Metallurgy*, s. 1–5, 1993.
15. Mavropoulos, T., Jonas, J.J., “Effect of boron on dynamic and static recrystallization in ultra low-carbon Nb steels”, *Metallurgy and Applications*, s. 229–235, 1985.
16. Taş, Z., “Relationship of microstructural–mechanical features in Nb-V alloyed boron steels”, *Erciyes University Journal of Science Institute*, 22, s. 52–160, 2006.
17. Samal, P.K., Terrell, J.B., “Effect of addition of boron on corrosion resistance of stainless steel”, *PM Science/Technol. Briefs*, vol.3, s. 18-22, 2001.
18. “2008 Bor Raporu”, *Eti Maden İşl. Gen. Müd. Yayınları*, Ankara, 2008.
19. İnternet: Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü <http://www.boren.gov.tr>
20. İnternet: Eti Maden İşletmeleri <http://www.etimaden.gov.tr>
21. Granga, R. A. ve Mitchell, J. B., *Transactions ASM*, 53, s. 157-162, 1961.
22. “Bor Sektörü Raporu”, *Eti Maden İşl. Gen. Müd. Yayınları*, Ankara, 2015.
23. John, V. B., “Understanding Phase Diagrams”, 2-3, *Macmillan Press*, London, 1974.
24. "Asil Çelik Teknik Yayınlar Serisi", Bölüm 5, s: 4-28 Bölüm 6, s: 4-48, Bölüm 7, s. 1-62, 1982.
25. Daldal, S., "Niobiyum Karbür Kaplamaların Özellikleri", *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2002.
26. Ulutan M., “Ç-4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması”, *Doktora Tezi*, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2007.
27. Avner, S.H., “Introduction to Physical Metallurgy”, *McGraw Hill Book Company*, 2.ed., s. 315-336, New York, 1986.
28. ASM Metals Handbook, “Properties and Selection, Iron, Steel and High Performance Alloys”, Tenth Edition, Fifth Printing, Materials Park, vol. 1, s. 1063, Ohio, USA, 1997.
29. ASM Handbook, Heat Treating, vol. 4, Tenth Edition, 1997.
30. Berns H., Theisen W., “Ferrous Materials: Steels and Cast Iron”, s. 39, 2008.
31. Smith, William F., “Structure and Properties of Engineering Alloys. 2nd ed.” *New York: McGraw Hill.*, s. 156, 1993.

32. Atik, E., "Farklı bir yüzey sertleştirme yöntemi: borlama", *Makine & Metal Teknolojisi*, 117, s. 86-90, 2001.
33. Goeriot, P.Y., Fillit, P., Thevenot, F., "The influence of alloying element additions on the boriding of steels", *Mat. Sci. and Eng.*, s. 9-19, 1982.
34. Özbek, İ., "Borlama yöntemiyle AISI M50, AISI M2 yüksek hız çeliklerinin ve AISI W1 çeliğinin performansının geliştirilmesi", *Doktora Tezi*, SAÜ Fen Bilimler Enstitüsü, s. 5-40, Sakarya, 2000.
35. Matuschka, A.G.V., "Boronozing", *Wien:Hanser*, s. 100-105, 1980.
36. Yücel, O., "Karbotermik ferrobor üretim parametrelerinin optimizasyonu", *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 16-55, İstanbul, 1992.
37. Özmen, L., Utkanlar, N. ve Özmel, B., "Borlu çelik", *Bildiriler Kitabı*, 3. *Uluslararası Bor Sempozyumu*, s. 49-55, Ankara, 2006.
38. Melloy, G.F., Slimmon, P.P., Podgursky, P.P., "Optimizing The Boron Effect", *Metallurgical Transactions*, 4, s. 2279-2289, 1973.
39. Kentaro, A. and Koji, S., "Behavior of boron in the phase transformation", *Research Review on Boron in Steels and Targets for Next Century*, s. 43-51, Tokyo, 1999.
40. T.C. Devlet Planlama Teşkilatı, "Kimyasal madde araştırması, bor bileşikleri", TÜMAŞ, T.C. Başbakanlık, Devlet Planlama Teşkilatı, Müsteşarlık Araştırma Grubu Başkanlığı, Ankara, 1990.
41. Roskill Information Service, "Roskill report: the economics of boron", *Roskill Information Service Ltd*, s. 55-95, U.K., 1999.
42. İzmir, A.İ., "Kimyasal buhar çöktürme yöntemi ile bor karbür üretimi", *Yüksek Lisans Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Ens., s. 3-7, 2001.
43. Otto, K. and Schrey, A., "Hard and protective materials", *Handbook of Thin Film Process Technology*, Z1, s. 1-12, 1995.
44. May, P. W., Rosser, K. N., Fox, N. A., Younes, C. M. and Beardmore, G., "Deposition of CVD diamond onto boron carbide substrates", *Diamond and Related Materials*, s. 450-455, 1997.
45. Hai-ying, C., Jing, W., Hai, Y., Wen-Zhi, L. and Heng-De, L., "Synthesis of boron carbide films by on beam sputtering", *Surface & Coating Tech.*, s. 128-129, 2000.

46. Kuhlman, U. and Weheit, E., “On the microstructure of boron carbide”, *Solid State Com.*, 83, s. 849-852, 1992.
47. Wang, X. M. and He, X. L., “Effect of boron addition on structure and properties of low carbon bainitic steels”, *ISIJ Int.*, 42, s. 621-633, 2002.
48. Armijo, J. S., Rosenbaum, H. S., “Boron Detection in Metals by Alpha-Particle Tracking”, *Journal of Applied Physics*, 38, s. 2064-2069, April 1967.
49. Er, Ü., Gaşan, H., “Bazı borlu çeliklerin toprak işleme aletlerinin uç demirlerinde kullanımının laboratuvar koşullarında incelenmesi”, *23. Ulusal Tarımsal Mekanizasyon Kongresi Bildiriler Kitabı*, Çanakkale, s. 232-230, 2006.
50. Kesti E., “Ç - 4140 çeliğinin, mikro yapı ve mekanik özelliklerine su verme ortamının etkilerinin araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2009.
51. Güleç, Ş., Aran, A., “Malzeme Bilgisi”, Cilt 2, TÜBİTAK Yayını, *MBEAE Matbaası*, Gebze, 1987.
52. Fountain, R. W., Chipman, J., “Solubility and precipitation of boron nitride in iron-boron alloys”, *Transactions of The Metallurgical Society of AIME*, 224, s. 599-605, 1962.

ÖZGEÇMİŞ

Pınar ATA ESENER 1988 yılında Almanya Reinbek’de doğdu. İlk öğreniminin bir kısmını Almanya da, kalan kısmını Sivas da, orta öğrenimini de Kayseri’de tamamladı. 2008’de kazandığı Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünden 2012 yılında mezun oldu. Aynı yıl Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalında Yüksek Lisansa başladı. 2015 yılında yüksek lisansını tamamladı. 2014 yılında Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisansa başladı.

Adres: 2000 Evler Mahallesi 55. Sokak No:5
50300 - Nevşehir
Telefon: 0507 391 71 25
e-posta : pinarata88@gmail.com

