

**DÜŞÜK KARBONLU ÇELİKLERE BOR İLAVESİNİN
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ**

Cemal ÇARBOĞA

**DOKTORA TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2010
ANKARA**

Cemal ÇARBOĞA tarafından hazırlanan ‘‘Düşük Karbonlu Çeliklere Bor İlavesinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi’’ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Burhanettin İNEM
Tez Danışmanı, Metal Eğitimi

.....

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Burhanettin İNEM
Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Sencer İMER
Metalürji, Aksaray Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Sedat ÖZBİLEN
Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Süleyman GÜNDÜZ
Metal Eğitimi, Karabük Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Kadir KOCATEPE
Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi

.....

Tarih: 21/01/2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

.....

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Cemal ÇARBOĞA

**DÜŞÜK KARBONLU ÇELİKLERE BOR İLAVESİNİN
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ
(Doktora Tezi)**

Cemal ÇARBOĞA

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2010**

ÖZET

Bu çalışmada, 1635 °C’de ergitilen Ç1020 malzemesine değişik oranlarda bor ilave edilerek seramik kalıplara iki adet döküm gerçekleştirilmiştir. I. döküm işleminde borsuz, 7, 15, 26, 29 ve 42 ppm bor elde edilmiştir. II. döküm işleminde ise 10, 17, 19, 23, 32, 42, 49 ve 63 ppm bor elde edilmiştir. Değişik oranlarda elde edilen borlu 30x30 mm kalınlığında kare malzemeler 2 pasoda haddelenerek % 70 – 80 deformasyon sağlanmıştır. 2. paso çıkış sıcaklığının östenit bölgesinde olmasına dikkat edilmiştir.

Haddelenen numuneler optik mikroskopta incelenmiş ve tane içerisinde heterojen 0,1 ila 1 µm arasında küresel noktalar olduğu gözlenmiştir. Ayrıca yer yer 1 ila 5 µm büyüklüğünde turuncu renkte köşegenli (genelde dikdörtgen) parçacıkların olduğu görülmektedir. Değişik bor oranlarında tane yapılarında belirgin bir fark görülmemiştir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapılan incelemelerde optik mikroskop ile görülen siyah noktaların sementit parçacıkları olduğu tespit edilmiştir. Optik mikroskop ile görülen turuncu renkte köşegenli parçacıkların ise titanyum nitrür (TiN) olduğu anlaşılmıştır. SEM ile yapılan incelemelerde bor tespit edilememiştir. Elektron Prob Mikro Analiz (EPMA) ile yapılan incelemelerde ise, özellikle ferrit tanelerinin içerisinde görülen siyah noktaların koyu olanların bor nitrür (BN) olduğu nokta

analizi ile tespit edilmiştir. Ayrıca EPMA ile yapılan haritalama metodu ile borun homojen olarak tane içerisinde dağıldığı gözlenmiştir.

Değişik oranlarda bor içeren Ç1020 çeliğine yapılan sertlik testlerinde 15 ppm bor içeren Ç1020 çeliğinde 20 HV5 değerinde bir artış gözlenmiştir. Çentikli darbe deneyinde 10 ppm bor içeren Ç1020 çeliğinde 2 joule bir artış gözlenmiş fakat bor oranının artmasıyla düşüş eğilimi göstermiştir. Sertlik ve darbe testleri sonucunda optimum bor oranının 10 ila 15 ppm olduğu sonucuna varılmıştır. Çekme testleri sonuçlarına göre ise, akma dayanımında 26 ppm bor içeren Ç1020 çeliğinde 17 MPa artış, çekme dayanımında ise 20 MPa artış olduğu gözlemiştir. Bor çelik içerisinde katı eriyik oluşturarak dayanım artırmıştır. Fakat vakumsuz indüksiyon ocağında döküm işleminin gerçekleştirilmesi işlemlerin kontrolünü zorlaştırmış ve bor nitrür oluşması engellenememiştir. Akma ve çekme dayanımı artarken süneklikte herhangi bir azalma görülmemiştir.

Haddelenmiş borsuz, 15 ve 26 ppm bor içeren Ç1020 malzemesi 875 °C'de 1 saat bekletilerek havada ve suda soğutularak ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir. Suda soğutulan numunelerin hepsinde martenzit görülürken, havada soğutulan homojen ferrit ve perlit içerdiği gözlenmiştir. Isıtma işlemi sonrası değişik bor oranlarında sertlik değerlerinde belirgin bir fark görülmemiştir. Ayrıca 200 °C'de 2,4, 6 ve 8 saat süre bekletilerek yaşlandırma işlemi uygulanmış fakat mevcut üretilen çeliğin yaşlandırma eğilimi olmadığı anlaşılmıştır.

Bilim Kodu : 710.3.022
Anahtar Kelimeler : Bor, Borlu Çelikler, Mikroyapı, Mekanik Testler
Sayfa Adeti : 210
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Burhanettin İNEM

EFFECT OF BORON ADDITION ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF LOW CARBON STEELS

(Doctoral Thesis)

Cemal ÇARBOĞA

GAZİ UNIVERSITY

THE INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

January 2010

ABSTRACT

In this study, two casts were carried out to ceramic molds by adding the boron at various ratios to the Ç1020 material melted at 1635 °C. In the first casting process boron-free, 7, 15, 26, 29 and 42 ppm boron were obtained, whereas 10, 17, 19, 23, 32, 42, 49 and 63 ppm boron were obtained in the second casting process. Square boron materials at 30x30 mm thickness obtained at various ratios were rolled at 2 pass, and 70 to 80 % deformation was provided. 2nd pass exit temperature was considered to be in the austenite region.

The rolled specimens were examined in optical microscope and it was observed that there were heterogeneous global points ranging between 0.1 to 1 µm in the grain. In addition, it was observed that from place to place there were diagonal orange (usually rectangular) particles at 1 to 5 µm in size. A significant difference was not observed in grain structure of various boron ratios. Point analyses of black dots observed with optical microscope were examined in analyses performed with Scanning Electron Microscope (SEM), and they were determined to be cementite particles. The diagonal orange particles observed with optical microscope were also understood to be titanium nitride particles (TiN). Boron could not be determined in analyses made with SEM. On the other hand, in analyses made with Electron Probe Micro Analysis (EPMA), the dark black dots observed particularly in ferrite grains were determined to be boron

nitride (BN) with point analysis. In addition, it was observed with the EPMA mapping method that the boron distributed homogenously within the grain.

In hardness tests conducted to Ç1020 steel containing various ratios of boron, an increase at 20 HV5 value was observed in Ç1020 steel containing 15 ppm boron. In notch impact test, an increase of 2 joule was observed in Ç1020 steel containing 10 ppm boron however it showed a falling tendency with an increase in boron ratio. As a result of hardness and impact tests, it was concluded that optimum boron ratio was between 10 and 15 ppm. On the other hand, according to the results of tensile tests, it was observed that while there was a 17 MPa increase in yield strength in Ç1020 steel containing 26 ppm boron, there was a 20 MPa increase in tensile strength. Boron increased the strength by creating a solid solution in the steel. However, conducting the casting process in a non-vacuum induction furnace made it difficult to control the processes. As a result, boron nitride formation could not be prevented. While yield strength and tensile strength increased, no decrease was observed in ductility.

The Ç1020 material containing rolled boron-free, 15 and 26 ppm boron were kept at 875 °C for 1 hour, and the heat treatment was conducted by cooling it in air and water. While martensite was observed in all specimens cooled in water, it was observed that specimens cooled in air contained homogenous ferrite and perlite. A significant difference could not be observed in hardness values of boron at various ratios after the heat treatment. In addition, aging treatment was applied by keeping it at 200 °C for 2, 4, 6 and 8 hours, but it was understood that the available produced steel did not have an aging tendency.

Science Code : 710.3.022

Key Words : Boron, Boron Steels, Microstructure, Mechanical Testing.

Page Number : 210

Thesis Supervisor : Prof. Dr. Burhanettin İNEM

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla ben yönlendiren hocam Prof. Dr. Burhanettin İNEM'e yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım hocam Prof. Dr. Sencer İMER'e teşekkürü bir borç bilirim.

TÜBİTAK MAM'da çalışan ve kendisini tanıdığımı çok mutlu olduğum Doç. Dr. Havva KAZDAL ZEYTİN'e, yine TÜBİTAK MAM'da çalışan Doç. Dr. Halil İbrahim BAKAN ve Doç. Dr. Yücel BİROL'a, döküm laboratuvarlarında çalışan Osman ÇAKIR'a, metalografi laboratuvarında çalışan Bilal TEYMÜR'e, Hüseyin AYDIN'a, Adem DENİZ'e, mekanik test laboratuvarlarında çalışan Aygün GÜNGÖR ve Hasan TAŞCAN'a, ayrıca İTÜ Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Onuralp YÜCEL'e ve Teknisyen Hasan DİNÇER'e, döküm işlemlerimize yardımcı olan Furkan Mühendislik A.Ş.'e, G.Ü. T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü Araştırma Görevlisi Volkan KILIÇLI'ya, Spectro analiz konusunda yardımlarını esirgemeyen Asil Çelik A.Ş. Kalite Müdürü Bülent ÖZMEL'e, Asil Çelik A.Ş. Kalite Müdür Yardımcısı Mehmet ÇAKICI'ya, Şereflikoçhisar ATL-TL-EML Müdürü Deniz KILINÇ'a ve Şereflikoçhisar İlçe Milli Eğitim Müdürü Musa ÖZTÜRK'e, Şereflikoçhisar Anadolu Lisesi Bilgisayar Öğretmeni Erdem Sefa ÇELİK'e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Doktora boyunca manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli eşim Nesrin ÇARBOĞA'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xix
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xxii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxvii
1. GİRİŞ.....	1
2. BOR VE MİNERALLERİ.....	6
2.1. Borun Tarihçesi.....	6
2.2. Borun Elde Edilmesi ve Saflaştırılması.....	8
2.2.1. Metallerle indirgeme.....	12
2.2.2. Elektrolizle indirgeme.....	12
2.2.3. Uçucu bor bileşiklerinin hidrojen ile indirgenmesi.....	13
2.2.4. Bor bileşiklerinin termal bozunması.....	14
2.3. Borun Kimyasal Yapısı ve Özellikleri.....	14
2.4. Borun Genel Kullanım Alanları.....	17
2.4.1. Cam elyafı	19
2.4.2. Borosilikat camlarda kullanımı.....	19

2.4.3. Seramikte kullanımı.....	19
2.4.4. Tarımda kullanımı.....	19
2.4.5. Temizletme ve beyazlatma sanayinde kullanımı.....	20
2.4.6. Nükleer uygulamalar.....	20
2.4.7. Enerji üretimi ve ısı depolama.....	20
2.4.8. Borlu katı yakıtlar/Yakıt hücreleri/(Fuel cells).....	20
2.4.9. Sağlık	21
2.4.10. Otomobil hava yastıkları, antifriz.....	21
2.4.11. İnşaat-Çimento sektöründe kullanımı.....	21
2.4.12. Ahşap koruma.....	21
2.4.13. Yanmayı önleyici (Geciktirici) maddeler.....	21
2.4.14. Füze / Uçuş yakıtları	22
2.4.15. Atık temizleme.....	22
2.5.Türkiye’de Bor Maden Yatakları ve Tarihçesi Tarihçesi.....	23
2.6.Türkiye’de Bor Üretimi.....	26
2.7.Dünya Bor Rezervleri.....	26
3. ÇELİK VE ÇELİĞİN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	28
3.1. Fe – C Denge Diyagramı.....	28
3.2. Alaşımsız Çelikler.....	30
3.2.1. Yumuşak veya az karbonlu çelikler.....	32
3.2.2. Orta karbonlu çelikler.....	34
3.2.3. Yüksek karbonlu çelikler ve karbon takım çelikleri.....	34

3.3. Alaşımli Çelikler.....	35
3.3.1. Az alaşımli çelikler.....	35
3.3.2. Yüksek alaşımli çelikler.....	36
3.3.3. Mikroalaşımli çelikler.....	36
3.4. Bazı Çelik Tipleri ve Çelik Kaliteleri.....	37
3.4.1. Yapı çelikleri.....	38
3.4.2. Genel yapı çelikleri.....	38
3.4.3. İnşaat (Beton) çelikleri.....	39
3.4.4. Otomat çelikleri.....	43
3.5. Alaşım Elementlerinin Çeliklere Etkisi.....	45
3.5.1. Katı çözelti durumu	47
3.5.2. İntermetalik bağlantı durumu.....	47
3.5.3. Sertleşme derinliği.....	49
3.6. Alaşım Elementleri ve Etkileri.....	55
3.6.1. Karbon (C).....	55
3.6.2. Mangan (Mn).....	56
3.6.3. Silisyum (Si).....	57
3.6.4. Kükürt (S).....	57
3.6.5. Fosfor (P).....	58
3.6.6. Molibden (Mo).....	58
3.6.7. Vanadyum (V).....	58
3.6.8. Niyobyum (Nb).....	59

3.6.9. Titanyum (Ti).....	59
3.6.10.Alüminyum (Al).....	59
3.6.11.Azot (N).....	59
3.7. Çeliklerde (Empüritelerin) Metalik Olmayan Elemanların Etkisi.....	59
3.8. Üretim Yöntemlerinin Etkisi.....	64
3.9. Döküm Tarzının Etkisi.....	68
4. DEMİR - BOR BİLEŞİKLERİ.....	72
4.1. Demir - Bor Denge Diyagramı.....	72
4.2. Ferrobor.....	73
4.3. Çelik Üretiminde Ferrobor.....	75
4.4. Serbest Bor (Efektif Bor).....	76
4.5. Bor Oksit (B_2O_3).....	77
4.6. Bor Nitrür.....	78
4.6.1. Altıgen bor nitrür.....	79
4.6.2. Kübik bor nitrür.....	80
4.6.3. Pirolitik bor nitrür.....	81
4.6.4. Bor nitrürün üretim metotları.....	81
4.6.5. Bor nitrürün kullanım alanı.....	82
4.7. Bor Karbür.....	84
4.7.1. Bor karbürün yapısı.....	85
4.8. FeB ve Fe_2B (Borlama İşlemi).....	87
4.8.1. Borlama yöntemleri.....	90

4.8.2. Borlanabilen malzemeler ve borürlerin genel özellikleri.....	94
4.8.3. Borür tabakasının yapı ve bileşimi.....	94
4.8.4. Demir borürlerin büyüme mekanizmaları ve özellikleri.....	96
4.9. Dökme Demirlerde Ferrobor.....	102
4.10. Amorf Metallerde Ferrobor.....	102
4.11. Borun Diğer Alaşım Elementleriyle Kıyaslanması.....	103
4.12. Bor Elementinin Sertleşebilirliğe Etkisi.....	104
5. BORLU ÇELİKLER.....	109
5.1. Borlu Çeliklerin Mekanik ve İşlenebilme Özellikleri.....	109
5.2. Borlu Çeliklerin Kullanım Alanları.....	110
5.3. Türkiye’de Üretilen Borlu Çeliklerin Kimyasal Analizleri ve Mikroyapılarının Karşılaştırılması.....	111
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	119
6.1. Malzeme ve Deneysel Çalışma Sistematiği.....	119
6.2. Döküm İşlemi Sonrası Arzu Edilen Kimyasal Analiz Sonuçları.....	121
6.3. Ç1020 Malzemesinin Döküm İşlemine Hazırlık Aşaması.....	123
6.4. Ç1020 Malzemesinin Kimyasal Analizi.....	124
6. 5. Birinci Döküm İşlemi.....	125
6.6. İkinci Döküm İşlemi.....	130
6.7. Haddeleme İşlemi.....	136
6.8. Mikroyapı İncelemesi.....	139
6.8.1. Optik mikroskop ile inceleme.....	139
6.8.2. Elektron mikroskopi (SEM) ile inceleme.....	139

Sayfa

6.8.3. Elektron prob mikroanaliz mikroskobi (EPMA) ile inceleme.....	140
6.9. Mekanik Testler.....	140
6.9.1. Sertlik Deneyi.....	140
6.9.2. Darbe Deneyi.....	141
6.9.3. Çekme Deneyi.....	141
6.10. Isıl İşlem ve Yaşlandırma İşlemi.....	143
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	144
7.1. Optik Mikroskop İncelemeleri.....	144
7.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri.....	161
7.3. Elektron Prob Mikroanaliz (EPMA) İncelemeleri	172
7.4. Sertlik Deney Sonuçları ve Tartışma.....	179
7.5. Darbe Deney Sonuçları ve Tartışma.....	183
7.6. Çekme Deneyi Sonuçları ve Tartışma.....	187
7.7. Isıl İşlem Sonuçları ve Tartışma.....	191
7.7.1. Isıl işlem sonrası mikroyapı sonuçları ve tartışma.....	191
7.7.2. Isıl işlem sonrası sertlik deney sonuçları ve tartışma.....	195
7.8. Yaşlandırma İşlemi Sonuçları ve Tartışma.....	198
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	201
KAYNAKLAR.....	203
ÖZGEÇMİŞ.....	209

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Bor mineralleri (Silis ihtiva etmeyen).....	9
Çizelge 2.2 Borosilikat mineralleri.....	11
Çizelge 2. 3. Bor ve bazı bileşiklerinin sertlikleri	14
Çizelge 2. 4. Borun kristal şekilleri ve parametreleri	15
Çizelge 2. 5. Dünya bor tüketiminin sektörel dağılımı.....	18
Çizelge 2. 6. Bazı özel bor kimyasalları için kullanım alanları.....	23
Çizelge 2. 7. Türkiye’de bulunan bor mineralleri.....	26
Çizelge 2. 8. Dünya bor rezervleri.....	27
Çizelge 3. 1. Alaşımsız çeliklerin kimyasal bileşim aralığı.....	31
Çizelge 3. 2. Bazı alaşımsız çeliklerin (sade karbonlu çeliklerin) tipik mekanik özellikleri ve kullanım alanları.....	33
Çizelge 3. 3. Çeliklerin alaşımlı sayılabilmesi için içerebilecekleri element miktarlarının alt sınırları.....	45
Çizelge 4.1. Bor nitrür ticari kalite sınıflandırması.....	78
Çizelge 4.2. Bor nitrürün diğer yüksek sıcaklık malzemeleri ile kıyaslamalı olarak özellikleri.....	79
Çizelge 4.3. Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılma.....	88
Çizelge 4.4. Fe ₂ B ve FeB fazlarının tipik özellikleri.....	101
Çizelge 5.1. 20MnCrS5 malzemesinin kimyasal analizi.....	111
Çizelge 5.2. 20MnCr5 + Bor malzemesinin kimyasal analizi.....	112
Çizelge 5.3. 20MnB4 malzemesinin kimyasal analizi.....	114
Çizelge 5.4. 20 Mn4 malzemesinin kimyasal analizi.....	115

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.5. SAE 15B41H malzemesinin kimyasal analizi.....	117
Çizelge 6.1. Saka Demir Çelik A.Ş. tarafından verilen numunenin % olarak kimyasal analizi.....	119
Çizelge 6.2. Döküm işlemi sonrası arzu edilen kimyasal analizler.....	123
Çizelge 6.3. Ç1020 çeliğinin % olarak kimyasal analizi.....	125
Çizelge 6.4. Alüminyum ve titanyum ilavesinden sonra alınan numunenin % olarak kimyasal analizi.....	126
Çizelge 6.5. Alüminyum, titanyum ve silisyum ilave edildikten sonra 2 adet dökülen numunenin % olarak kimyasal analizi.....	126
Çizelge 6.6. 15 ppm oranında bor oluşturan 1,16 gr ferrobor ilavesi sonrası 2 adet dökülen Ç1020 çeliğinin % olarak kimyasal analizi.....	127
Çizelge 6.7. Mevcut ergiğiye 15 ppm oranında bor oluşturan 1,16 gr ferrobor ilavesi sonrası 2 adet dökülen Ç1020 çeliğinin % olarak kimyasal analizi.....	127
Çizelge 6.8. 20 ppm oranında bor oluşturan 1,54 gr ferrobor ilavesi sonrası 2 adet dökülen Ç1020 çeliğinin % olarak kimyasal analizi.....	128
Çizelge 6.9. 20 ppm oranında bor oluşturmamak için 1,54 gr ferrobor ilavesi sonrası 1 adet dökülen Ç1020 çeliğinin % olarak kimyasal analizi.....	128
Çizelge 6.10. Birinci döküm sonrası dökülen değişik oranlarda bor içeren Ç1020 çeliğinin % olarak kimyasal analizlerinin karşılaştırılması...	129
Çizelge 6.11. 10 ppm bor için 0,77 gr ferrobor ilavesi sonrası 1 adet dökülen Ç1020 çeliğinin % olarak kimyasal analizi.....	131
Çizelge 6.12. 15 ppm oranında bor için 1,16 gr ferrobor ilavesi sonrası 1 adet dökülen Ç1020 çeliğinin % olarak kimyasal analizi.....	131
Çizelge 6.13. 10 ppm oranında bor ilavesi için 0,77 gr ferrobor ve 600 ppm oranında alüminyum ilavesi için 14 gr % 99 saflıkta alüminyum ilavesi sonrası dökülen 1 adet Ç1020 çeliğinin % olarak kimyasal analizi.....	132

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.14. 10 ppm oranında bor ilavesi için 0,77 gr ferrobor ilavesi sonrası dökülen 1 adet Ç1020 çeliğinin % olarak kimyasal analizi.....	132
Çizelge 6.15. 15 ppm oranında bor ilavesi için 1,16 gr ferrobor ve 600 ppm oranında alüminyum ilavesi için 14 gr % 99 saflıkta alüminyum ilavesi sonrası dökülen 1 adet Ç1020 çeliğinin % olarak kimyasal analizi.....	133
Çizelge 6.16. 15 ppm oranında bor ilavesi için 1,16 gr ferrobor ilavesi sonrası 1 adet dökülen Ç1020 çeliğinin % olarak kimyasal analizi.....	133
Çizelge 6.17. 10 ppm oranında bor ilavesi için 0,77 gr ferrobor ilavesi sonrası dökülen 1 adet Ç1020 çeliğinin % olarak kimyasal analizi.....	134
Çizelge 6.18. 25 ppm oranında bor için 1,88 gr ferrobor ve 400 ppm oranında alüminyum ilavesi için 10 gr % 99 saflıkta alüminyum ilavesi sonrası dökülen 1 adet numunenin kimyasal analizi.....	134
Çizelge 6.19. İkinci döküm sonrası dökülen kare malzemelerin % olarak kimyasal analizlerinin karşılaştırılması.....	135
Çizelge 6.20. Birinci döküm numunelerin haddeleme işleminde pasolar arası çıkış sıcaklıkları.....	137
Çizelge 6.21. İkinci döküm numunelerin pasolar sonrası çıkış sıcaklıkları.....	138
Çizelge 6.22. Çekme deneyinde kullanılan deney numunesinin boyutları.....	142
Çizelge 7. 1. 1-1 numaralı 1 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinden alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafında belirtilen şeklin analizi.....	163
Çizelge 7. 2. 3-1 numaralı 15 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinden alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafında belirtilen şeklin analizi.....	165
Çizelge 7. 3. 3-1 numaralı 15 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinden perlit bölgesinden alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafında belirtilen şeklin analizi.....	166
Çizelge 7. 4. 4-2 numaralı 29 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinden alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafında belirtilen şeklin analizi.....	168

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7. 5. 7 numaralı 19 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinden alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafında belirtilen şeklin analizi.....	170
Çizelge 7.6. Hadde yönüne dik ve paralel doğrultuda birinci döküm numunelerin sertlik değerleri.....	180
Çizelge 7.7. Hadde yönüne dik ve paralel doğrultuda ikinci döküm numunelerin sertlik değerleri.....	181
Çizelge 7.8. Birinci döküm numunelerinin çentikli darbe deney sonuçları.....	183
Çizelge 7.9. İkinci döküm numunelerinin çentikli darbe deney sonuçları.....	185
Çizelge 7.10. Birinci döküm numunelerin çekme test sonuçları.....	187
Çizelge 7.11. İkinci döküm numunelerin çekme test sonuçları.....	189
Çizelge7. 12. Suda soğutulmuş Ç1020 çeliğinin Vickers sertlik deney sonuçları	195
Çizelge7. 13. Havada soğutulmuş Ç1020 çeliğinin Vickers sertlik deney Sonuçları.....	196
Çizelge 7. 14. 200 °C de değişik sürelerde yapılan yaşlandırma işlemi sonucu Vickers sertlik sonuçları.....	199

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2. 1. Bor tüketiminin nihai kullanım alanlarına göre dağılımı.....	18
Şekil 3. 1. Demir – Karbon denge diyagramı.....	29
Şekil 3. 2. Tempcore prosesinin metalürjisi.....	41
Şekil 3. 3. Çeşitli alaşım elementlerinin α – demirinin sertliğine etkisi.....	51
Şekil 3. 4. Alaşım elementleriyle Demir-Karbon denge diyagramındaki önemli karakteristik noktaların konumlarının kayması.....	49
Şekil 3. 5. Demir-karbon denge diyagramında S ve E noktalarının alaşım elementleri etkisiyle değişimi.....	50
Şekil 3. 6. γ - katı çözeltilerinin bulunduğu sahanın alaşım elemanlarıyla değişmesi.....	51
Şekil 3. 7. Alaşım elementlerinin ve diğer etkenlerin, ZSD diyagramında dönüşüm kademelerini kaydırması.....	52
Şekil 3. 8. % 0,9 C'lu alaşımsız çelikte, perlit kademesinde dönüşümün başlangıç eğrisinin, Mn miktarı ile değişimi.....	53
Şekil 3. 9. Alaşım elementlerinin etkisiyle, perlit ve beynit kademelerinin belirgin olarak birbirinden ayrılması.....	53
Şekil 3.10. Uygun ortamlarda ani soğutma yapılmış, alaşımsız, düşük alaşımlı ve yüksek alaşımlı çeliklerde, şematik olarak sertleşme derinliklerinin karşılaştırılması.....	54
Şekil 3. 11. Alaşımsız çeliklerin haddelenmiş halde mekanik özellikleri.....	56
Şekil 3. 12. % 0,035 C ve % 0,015 N içeren çelikte yaşlanma sürelerine bağlı olarak özellik değişimleri.....	61
Şekil 3. 13. Azot miktarına bağlı olarak çekme ve çentik darbe dayanımı.....	61
Şekil 3. 14. Kaynar dökülmüş Thomas ve Siemens–Martin çeliklerinde çentik darbe dayanımı değerinin azot ve fosfor miktarına göre değişimi....	62

Şekil	Sayfa
Şekil 3. 15. Haddelenmiş çelikte fosfor segregasyonu.....	64
Şekil 3. 16. Bir ray malzemesinde kükürt segregasyonu.....	64
Şekil. 3. 17. Çelik kütüklerde blok segregasyonu.....	68
Şekil 3. 18. Sacdan imal edilmiş bir dövme parçasında katmer durumu.....	70
Şekil 4.1. Demir - bor denge diyagramı.....	72
Şekil 4.2. Östenitten ferrite dönüşümü esnasında tanelerde meydana gelen değişiklik.....	77
Şekil 4.3. Bor karbürün rombohedral birim hücresi.....	86
Şekil 4.4. Borür tabakalarının türleri.....	95
Şekil 4.5. Borür tabakasının şematik olarak gösterilişi.....	97
Şekil 4.6. Gaz ortamında borlama işlemine tabi tutulan bir malzemenin yüzeyinde oluşan borür tabakası ve matris içerisindeki B ve Fe dağılımı.....	98
Şekil 4.7. Fe ₂ B kristalinin (001) düzlemindeki projeksiyonu.....	100
Şekil. 4.8. FeB kristalinin (001) düzlemindeki projeksiyonu.....	100
Şekil 4.9. Segregasyon ve çökelti eğrisi.....	104
Şekil 4.10. 3Mn5B çeliğinde borun dağılım modeli.....	105
Şekil 4.11. Borun sertleşebilirliğe etkisi.....	106
Şekil 4.12. Dönüşüm karakterleri üzerine borun etkisi.....	107
Şekil 4.13. Bor-Karbon ilişkisi.....	108
Şekil 6.1. Deneysel çalışma sistematığının şematik gösterimi.....	120
Şekil 6.2. Bor nitrür ve titanyum nitrürün oluşum önceliğine göre ellingham Diyagramı.....	121
Şekil 6.3. Alüminyum, silisyum, kalsiyum ve borun oksitle bileşik oluşturma önceliğine göre ellingham diyagramı.....	122

Şekil	Sayfa
Şekil 6.4. Çekme deneylerinde kullanılan dikdörtgen çekme deney numunesi....	142
Şekil 7.1. Hadde yönüne dik ve paralel doğrultuda birinci döküm numunelerin sertlik değerleri grafiği.....	181
Şekil 7.2. Hadde yönüne dik ve paralel doğrultuda ikinci döküm numunelerin sertlik değerleri grafiği	182
Şekil 7.3. Birinci döküm numunelerinin çentikli darbe deney sonuçları grafiği.....	184
Şekil 7.4. İkinci döküm numunelerinin çentikli darbe deney sonuçları grafiği.....	186
Şekil 7.5. Birinci döküm numunelerin çekme test sonuçları grafiği.....	188
Şekil 7.6. Birinci döküm sonrası çekme testi % uzama ve kesit daralması sonuç değerleri grafiği.....	188
Şekil 7.7. İkinci döküm numunelerin çekme test sonuçları grafiği.....	190
Şekil 7.8. İkinci döküm sonrası çekme testi % uzama ve kesit daralması sonuç değerleri grafiği.....	190
Şekil 7.9. Havada ve suda soğutulmuş Ç1020 malzemesinin hadde yönüne dik yönde elde edilen sertlik değerleri.....	196
Şekil 7.10. Havada ve suda soğutulmuş Ç1020 malzemesinin hadde yönüne paralel yönde elde edilen sertlik değerleri.....	197
Şekil 7.11. Suda soğutulmuş farklı oranlarda bor içeren numunelere değişik sürelerde uygulanan yaşlandırma işlemi sonucu sertlik değerleri grafiği.....	200

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3. 1. Ç1020 çeliğinin iç kısımlarından çekilmiş mikroyapı fotoğrafı.....	42
Resim 3. 2. Ç1020 çeliğinin yüzey kısımlarından çekilmiş mikroyapı fotoğrafı..	42
Resim 3. 3. Ç1020 çeliğinin yüzeydeki martenzit yapı ile merkezde bulunan ferrit ve perlit yapı arasındaki geçiş bölgesinin mikroyapı fotoğrafı	43
Resim 5.1. 20MnCrS5 malzemesinin mikroyapı fotoğrafı	112
Resim 5.2. 20MnCrS5 + Bor malzemesinin mikroyapı fotoğrafı	112
Resim 5.3. 20MnCrS5 malzemesinin mikroyapı fotoğrafı	113
Resim 5.4. 20MnCrS5+Bor malzemesinin mikroyapı fotoğrafı.....	113
Resim 5.5. 20MnB4 malzemesinin mikroyapı fotoğrafı.....	115
Resim 5.6. 20Mn4 malzemesinin mikroyapı fotoğrafı	115
Resim 5.7. 20MnB4 malzemesinin mikroyapı fotoğrafı.....	116
Resim 5.8. 20Mn4 malzemesinin mikroyapı fotoğrafı.....	116
Resim 5.9. SAE 15B41H malzemesinin mikroyapı fotoğrafı	117
Resim 5.10. SAE 15B41H malzemesinin mikroyapı fotoğrafı	118
Resim 7.1. 1-1 numaralı 1 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	144
Resim 7.2. 1-1 numaralı 1 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	144
Resim 7.3. 1-1 numaralı 1 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin kenar bölgesinden haddeleme yönüne paralel olarak çekilmiş mikroyapı fotoğrafı.....	145
Resim 7.4. 2-1 numaralı 7 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	146

Resim	Sayfa
Resim 7.5. 2-1 numaralı 7 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	146
Resim 7.6. 3-1 numaralı 15 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	147
Resim 7.7. 3-1 numaralı 15 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	148
Resim 7.8. 4-1 numaralı Ç1020 26 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	149
Resim 7.9. 4-1 numaralı Ç1020 26 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı....	149
Resim 7.10.4-2 numaralı 29 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	150
Resim 7.11.4-2 numaralı 29 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	150
Resim 7.12.5 numaralı 42 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	151
Resim 7.13.5 numaralı 42 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	151
Resim 7.14.6 numaralı 10 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	152
Resim 7.15. 6 numaralı 10 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	153
Resim 7.16.6 numaralı 10 ppm bor içeren Ç1020 çeliğinin kenar kısımlarından alınmış mikroyapısı fotoğrafları.....	153
Resim 7.17.7 numaralı 17 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	154
Resim 7.18.7 numaralı 17 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	154

Resim	Sayfa
Resim 7.19.8 numaralı 19 ppm oranında bor içeren malzemesinin Ç1020 haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	155
Resim 7.20.8 numaralı 19 ppm oranında bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı....	155
Resim 7.21.9 numaralı 23 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	156
Resim 7.22.9 numaralı 23 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	156
Resim 7.23.10 numaralı 32 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	157
Resim 7.24.10 numaralı 32 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	157
Resim 7.25.11 numaralı 42 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	158
Resim 7.26.11 numaralı 42 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	158
Resim 7.27.12 numaralı 49 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	159
Resim 7.28.12 numaralı 49 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	159
Resim 7.29.13 numaralı 63 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	160
Resim 7.30.13 numaralı 63 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı.....	160
Resim 7.31.SEM incelemesi sonucu elde edilen ferrit ve perlit tanelerini gösteren mikroyapı fotoğrafı.....	161
Resim 7.32.1-1 numaralı 1 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafı ve grafiği.....	162

Resim	Sayfa
Resim 7.33.3-1 numaralı 15 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafı ve grafiği.....	164
Resim 7.34.3-1 numaralı 15 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak perlit bölgesinden alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafı ve grafiği.....	165
Resim 7.35.4-2 numaralı 29 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak perlit bölgesinden alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafı ve grafiği.....	167
Resim 7.36.7 numaralı 19 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafı ve grafiği.....	169
Resim 7.37.7 numaralı 19 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin SEM ile element haritalama yapılan bölge fotoğrafı.....	170
Resim 7.38.7 numaralı 19 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin SEM ile yapılan element haritalama sonucu karbon ve alüminyumun dağılımı.....	171
Resim 7.39.7 numaralı 19 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin SEM ile yapılan element haritalama sonucu silisyum ve manganın dağılımı..	171
Resim 7.40.1-1 nolu 1 ppm'in altında bor içeren numunenin EPMA ile element haritalama bölge fotoğrafı.....	172
Resim 7.41.1-1 nolu 1 ppm'in altında bor içeren numunenin EPMA ile element haritalama sonucu alüminyum ve bor elementinin dağılımı.....	173
Resim 7.42.1-1 nolu 1 ppm'in altında bor içeren numunenin EPMA ile element haritalama sonucu azot ve titanyum elementinin dağılımı.....	173
Resim 7.43.4-1 nolu 26 ppm bor içeren numunenin EPMA ile element haritalama bölge fotoğrafı.....	174
Resim 7.44.4-1 nolu 26 ppm bor içeren numunenin EPMA ile element haritalama sonucu alüminyum ve bor elementinin dağılımı.....	175

Resim	Sayfa
Resim 7.45.4-1 nolu 26 ppm bor içeren numunenin EPMA ile element haritalama sonucu azot ve titanyum elementinin dağılımı.....	175
Resim 7.46.4-2 nolu 29 ppm bor içeren numunenin EPMA ile element haritalama bölge fotoğrafı.....	176
Resim 7.47.4-2 nolu 29 ppm bor içeren numunenin EPMA ile element haritalama sonucu alüminyum ve bor elementinin dağılımı.....	177
Resim 7.48.4-2 nolu 29 ppm bor içeren numunenin EPMA ile element haritalama sonucu azot ve titanyum elementinin dağılımı.....	177
Resim 7.49. EPMA ile yapılan nokta incelemeleri sonucunda BN oluşumu.....	178
Resim 7.50. EPMA nokta analizi sonucu elde edilen bor nitrürün grafik resmi...	178
Resim 7.51. Havada soğutulmuş 1 ppm (borsuz) içeren malzemenin mikroyapı fotoğrafı (X500).....	191
Resim 7.52. Suda soğutulmuş borsuz malzemenin mikroyapı fotoğrafı (X500).....	192
Resim 7.53. Havada soğutulmuş 15 ppm içeren malzemenin mikroyapı fotoğrafı (X500).....	193
Resim 7.54. Suda soğutulmuş 15 ppm içeren malzemenin mikroyapı fotoğrafı (X500).....	193
Resim 7.55. Havada soğutulmuş 26 ppm içeren malzemenin mikroyapı fotoğrafı (X500).....	194
Resim 7.56. Suda soğutulmuş 26 ppm içeren malzemenin mikroyapısı fotoğrafı (X500).....	194

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklama

ppm

Parts Per Million

B

Bor

BN

Bor Nitrür

gr

Gram

kg

Kilogram

TiN

Titanyum Nitrür

Kısaltmalar

Açıklama

HSLA

Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı Çelikler

MTA

Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü

YDDA

Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı Çelikler

VSD

Vickers Sertlik Değeri

LD

Linz ve Donawitz

PVD

Fiziksel Buhar Biriktirme

CVD

Kimyasal Buhar Biriktirme

TSE

Türk Standartları Enstitüsü

WDS

Dalga Boyu Ayırmalı

EDS

Elektron Boyu Ayırmalı

1.GİRİŞ

Bor doğada tüm canlıların yaşamlarını sürdürmesi için önemli elementlerden birisidir. Bor ve bileşikleri birçok endüstriyel alanda kullanıldığı gibi metalürji ve malzeme alanında kullanılması sonucu stratejik bir maden olmuştur[1]. Teknolojide ileri ülkelerin, çoğunda bor cevherinin hiç bulunmamasına rağmen, bor minerallerinden çeşitli bor bileşikleri elde etmek, bunları çeşitli endüstri alanlarında eşdeğer kimyasallardan daha etkin ve yaygın bir şekilde kullanmak üzere, yoğun bir çalışma yapmaktadırlar.

Bor, oda sıcaklığında çeliklerde çok az çözünürlüğe sahip olup, sertleşebilirlik ve dönüşüm karakterleri üzerine önemli bir etkiye sahip olması nedeniyle çeliklerin özelliklerinin geliştirilmesinde çok büyük yarar sağlamaktadır. Bor ve bileşiklerinin çelik malzemelere sağladıkları yararlar; yüksek ısıya dayanım, yüksek mukavemet, yüksek elastiklik, yüksek yüzey koruma, yüksek aşınma ve korozyona dayanım, yüksek yapışma ve tutunma gibi özellikler kazandırmaktadır[2].

Borlu çeliklerle ilgili çalışmalar 1935 yıllarında başlamış ve 1941 yılında Jominy test metodunun bulunması ve 1941’de II Dünya Savaşı borlu çeliklerin gelişimini artırmıştır.

1946 yılında borun çelik mikroyapısında sağladığı etkileri ve değişimleri ilk Granga, R. A. ve Garvey, T. M. gözlemlemişlerdir ve aynı zamanda karbon içeriğinin artmasıyla birlikte borun etkisinin azaldığını ortaya çıkarmışlardır[3].

1950 Kore Savaşı yıllarında borlu çeliğe olan talep artmıştır. 1961 yılında Granga, R. A. ve Mitchell, J. B., borlu çeliklerin dört ana karakterini ortaya çıkarmışlardır. Bunlar; küçük miktarda ilave ile borun etkisi arasındaki bağlantı olduğunu, yüksek östenitleme nedeniyle sertliğin kaybolduğu, karbon içeriğinin sertleşebilirliği etkilediği ve özel bir yapının oluştuğunu gözlemlemişlerdir[4].

1962 yılında R. W. Fountain ve J. Chipman, demir içerisindeki azotun çözünübilirliği üzerine borun etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, 950 ile 1150 °C östenitlenen malzeme ön nitrürasyona tabii tutulmadığında bor, azot ile birleşerek Bor nitrür (BN) oluşturduğunu gözlemlemişlerdir[5].

1971 yılında Ohmori, Y. yaptığı çalışmada, % 0,19 C çeliğe 87 ppm bor ilave etmiştir. Vakumlu indüksiyon ocağı kullanmış ve boru oksijenden korumak için 340 ppm Alüminyum kullanmıştır. Sonuç olarak da, 1100 °C’de sıcaklıkta östenitlendikten sonra 900 - 650 °C sıcaklıklarda tane sınırları boyunca borlu ikinci faz oluşmuş ve bu yapının $Fe_{23}(BC)_6$ olduğunu ve 900 °C’de östenitlenen numunenin yapısında bor karbürün gelişi güzel dağıldığını gözlemlemiştir[6].

Melloy, G.F., Slimmon, P.P. ve Podgursky, P.P. 1973 yayınlanan makalelerinde, Ç1020 çeliğine 1, 2, 12, 16, 20, 24, 26 36, 42, 57, 88 ve 110 ppm’lerde bor ilavesinde; sertleşebilirliğe, çentik tokluğuna ve mikroyapıya optimum etkiyi yapan bor miktarını belirlemeye çalışmışlardır. Sonuç olarak, çentik tokluğunun ve sertleşebilirliğin en yüksek olduğu değer % 0,0015 - 0,0025 ppm değeri olduğunu gözlemlemiştir. Akma dayanımının ise, 20 ppm bor ilavesinde en yüksek değere ulaştığı belirlemiştir[7].

1974 yılında Llewellyn, D. T. ve Cook, W.T.yapmış oldukları çalışmada, sıcak işlenmiş borlu çeliklerin metalürjisini incelemeyi amaçlamışlardır. Numune olarak SAE 8600 çeliği seçilmiş ve çeliğe ilave edilen boru oksijen ve azottan korumak için 300 ppm Alüminyum ve 300 ppm Titanyum ilave etmişlerdir. Sonuç olarak, numune olarak kullanılan SAE 8600 çeliğine değişik oranlarda bor ilave edilmiş ve çekme dayanımının maksimum olduğu bor miktarı yaklaşık 10 ppm olduğunu gözlemlemiştir. Sertleşebilirlik için düşük alaşımlı çeliklerde kritik karbon seviyesinin % 0,53 olduğunu gözlemlemiştir. Hâlbuki sade karbonlu çeliklerde bu oranın % 0,85 olduğunu söylemektedirler. Darbe dayanımına maksimum etki 30 ppm olduğunu ve bor içeriğinin artması durumunda darbe dayanımının düştüğünü gözlemlemiştir[8].

Malinotchka, Y. N., Koval'chuk, G.Z. ve Yarmosh, V.N., 1983 yılında yayınladıkları makalede, Ç1020 çeliklerinin östenit sıcaklığında borun çözülebilirliği üzerine bakır ilavesinin etkisi ve aynı zamanda bu çeliklerde bor elementinin çökeltisini ve dağılımını incelenmiştir. Sonuç olarak, bakırın olmadığı borlu çeliklerle bakır ve bor ilave edilmiş çelikler kıyaslandığında dayanım ve özellikle kırılma tokluğu değerleri, bakır ve bor ilave edilmiş çeliklerin daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir[9].

1989 yılında Almanya'da Paju, M., Hougardy, H. P. ve Grabke, H.J., su verilmiş ve tavllanmış yüksek saflıktaki laboratuvar çeliklerinin mekanik özellikleri üzerine borun etkisini araştırmışlardır. 20MnCr5 malzemeye 2, 13, 22, 31 ppm oranlarında bor ilave etmişlerdir. Sonuç olarak, yapılan değişik miktarda bor ile alaşımlandırmanın sertleştirilmiş ve tavllanmış çeliklerin çekme dayanımına etkisinin olmadığı sonucuna varmışlardır. Çalışılan çeliklerin darbe tokluğu Ti(C,N) çökeltilerin boyutlarına bağlı olarak kontrol edilebileceği sonucunu çıkarmışlardır[10].

Taylor, K. A. ve Hansen, S.S., 1990 yılında yaptıkları çalışmada, 0,2 C - 6 Mn - 0,5 Mo çeliklerine vakumlu indüksiyon ocağında 0, 10, 20, 50 ve 100 ppm B ilave ederek termomekanik süreç içerisinde oluşan çökelti ve segregasyonlar incelemişlerdir. Aynı zamanda oksijen ve azottan korumak için 340 ppm Alüminyum ile 400 ppm Titanyum ilave edilmiştir. Sonuç olarak da, 50 ppm ve üzerindeki bor ilavelerinde bor östenit tane sınırları boyunca bor karbürler oluştuğunu gözlemlemişlerdir. 10 ile 20 ppm borun sertleşebilirlik üzerine etkisi daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır. 50 ppm ve daha fazla B içeren numuneleri 10 ila 20 ppm B içeren numunelerle kıyaslamışlar ve 50 ppm ve daha fazla B içeren numunelerin sertliğinin az olduğunu gözlemlemişlerdir[11].

Y. R. Cho, S.I. Kim ve B. S. Seong, 2004 yılında Kore'de yapılan bir çalışmada; haddeleme sıcaklığına bağlı olarak, çökeltme davranışı ve ferrit morfolojisinin gelişimini açıklamak için, düşük karbonlu çeliklerin mekanik özellikleri ve mikroyapı üzerine borun etkisini araştırmışlardır. Sonunda da, bor eklenmiş ticari çeliklerin haddeleme sonuçları ile bor eklenmemiş ticari çeliklerin haddeleme sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, Bor nitrür çökeltilerinin CuS ve MnS

üzerinde çekirdeklendiği ve bor nitrür (BN) çökeltilerinin boyut ve hacimsel oranının azalan haddeleme sıcaklığıyla birlikte arttığını gözlemlemişlerdir. Bor eklenmiş düşük karbonlu çeliklerin sünekliğinin, yaklaşık % 5 oranında ticari çeliklerden daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir[12].

Son 15 - 20 yıl içerisinde ise; Almanya, ABD, Rusya, Japonya, Çin gibi gelişmiş ülkelerde borun kullanım alanı ile ilgili birçok çalışma yapılmış ve borun kaynaklanabilirlik, kırılma tokluğunu iyileştirmesi gibi başka başka faydaları olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bu gelişmeler de dökme demirlerde, paslanmaz çeliklerde, kesme takımlarında, nükleer reaktörlerde elektron çubuklarının üretiminde olduğu gibi birçok malzeme üretiminde kullanım alanı bulmuştur.

Türkiye’de ise bor, çelik sektöründe Bursa Asil Çelik A.Ş. tarafından 2000’li yılların başlangıcında borlu çelik üretilmiştir. Hatay İskenderun Demir Çelik, Çanakkale İçdaş ve İzmir Ege Çelik’de ise 2005 yılında yine sertleşebilirlik özelliğini iyi olması nedeniyle borlu çelik üretmeye başlamışlardır. Özellikle vida yapımında kullanmak amacıyla üretimlerini gerçekleştirmişlerdir. 2007 başı itibari ile de İçdaş borlu çelik üretimi bırakmıştır. Üretim aşamasındaki işlem basamaklarının ve haddeleme sıcaklığının önemli olması gibi zorluklar borlu çeliğin üretimini zorlaştırmaktadır.

Ülkemizde borlu çeliklerin üretilmesi üzerine Yüksek Lisans ya da Doktora Tezine raslanmamıştır. Fakat borlu yüzey kaplama üzerine birçok çalışma mevcuttur.

Yapılan bu çalışmanın amacı: Düşük karbonlu yapı çelikleri toplam çelik üretimi içerisinde en büyük paya sahiptir. İnşaat çelikleri ve doğal gaz boru hatlarında kullanılan çelikler ise yapı çelikleri içerisinde önemli bir yere sahiptir. İnşaat çelikleri ve büyük çaplı doğal gaz boru hatlarında kullanılan yapı çeliklerinde yüksek akma gerilmesi, iyi kaynak edilebilirlik, tokluk ve süneklik aranmaktadır. İnşaat çelikleri ve doğal gaz boru hatlarında kullanılan yapı çeliklerinden istenen mekanik özellikleri klasik üretimlerde, bazı düzenlemelerle, örneğin kimyasal bileşimin niyobyum ve vanadyum gibi elementlerle mikro düzeyde alaşımlandırma ile

modifiye edilmesi ile sağlanabilmektedir. Ancak bunlar pahalı ve ilave işlem gerektiren uygulamalardır.

İnşaat ve doğal gaz boru hatlarında kullanılan yapı çeliklerinden Ç1020 çeliğine değişik oranlarda bor ilave edilerek mikro alaşımlama yapılmıştır. Ç1020 çeliğe 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 ve 40 ppm bor ilave edilerek optimum bor oranının belirlenmesi ve Ç1020 çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ile adi çelikten kaliteli çelik elde edilmesi, pahalı yöntem olan niyobyum ve vanadyum ilavesi ile yapılan mikro alaşımlama yerine, daha ucuz olan ve dünya rezervinin % 72'sinin ülkemizde olduğu bor ilave edilerek mikro alaşımlama yaparak ülke ve dünya çelik üretimine katkı sağlamak amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, yapı ve inşaat çeliği olarak kullanılan Ç1020 çeliğine değişik oranlarda bor ilave edilerek esas malzeme ile değişik oranlarda bor ilave edilmiş çeliklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Esas malzeme ile değişik oranlarda bor ilave edilerek dökülen çelikler döküm sonrası havada soğutulmuş, daha sonra 1200 °C de 60 dakika bekletilmiş ve % 70 - 80 oranlarında sıcak deformasyon uygulanarak haddelenmiştir. Haddelenen borlu çeliklerin ve esas malzemenin mikroyapısal özellikleri, çekme dayanımları, sertlik değerleri ve çentik darbe dayanımları karşılaştırılmıştır. Esas malzeme ile değişik oranlarda üretilen bor ilave edilmiş çeliklerin çentik darbe dayanımları, sertlik değerleri ve çekme dayanımlarında oluşan farklar, mikroyapı ile de ilişkilendirilmiştir.

İçerik olarak, Bölüm 2 de bor ve bor mineralleri, borun kullanım yerleri tanıtılmış, Bölüm 3 de çelik ve mekanik özellikleri, Çeliğin mekanik özelliklerinin nasıl değiştirilebileceği ve çelik türleri hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 4 de Fe-B denge diyagramı, ferrobör ve borun çelik içerisinde bulunma şekilleri anlatılmış, Bölüm 5 de borlu çelikler, Türkiye'de üretilen borlu çelikler ve bunların mikro yapıları hakkında bilgi verilmiştir. Deneysel çalışmalar hakkında bilgiler Bölüm 6 da verilirken, Bölüm 7 de deney sonuçları ve bu sonuçlar literatür ile karşılaştırılarak tartışılmıştır.

2. BOR VE MİNERALLERİ

2.1. Borun Tarihçesi

Bor mineralleri içerisinde eski devirlerde ticareti yapılan ilk madde boraktır. M.Ö. 2000 yıllarında Babilliler, altının işlenmesi için boraksı uzak doğudan ithal etmişlerdir ve yine boraks, eski Mısır ve Roma devrinde sert borosilikat camının hazırlanmasında kullanmışlardır. Boraks kaplamaları M.S. 300 yıllarında biliniyordu. Arap kimyacısı Jabin İbn Haiyan, kendi notlarında boraks için baurach kelimesini kullanmıştır. O zamanlarda bu madde Tibet'ten gelmiştir. Marco Polo 13. yüz yılda gerçek boraks örneklerini Moğolistan'dan Avrupa'ya getirmiş, bu maddeye Sanskrit (eski Hindu) dilinde, ‘tincans’ denilmesi nedeniyle ‘tincal’(tinkal) denilmiştir. 1556 yılında G. Angricola, De re Metallica'yı yayınladığında, boraks Avrupa'da yaygın bir şekilde Flux (katkı) olarak kullanılıyordu.

1702 yılında tinkal için gerçek kimyasal araştırmalar başlamış, G. Hamberg boraksı demir sülfatla karıştırarak borik asidi elde etmiştir. Ancak bu maddeye tıp dilinde sakinleştirici anlamında sal sedativum denilerek bir hata yapılmıştır. Sonraki 50 yılda L. Lemery (1728) ve C.J. Geoffroy (1732) borik asidi, bileşenlerin tabiatı bilinmesine rağmen, boraksı asitlerle ısıtarak elde etmişlerdir. J.H. Pott (1741) boraksın alkol alevine tutulduğunda yeşil ışık verdiğini gözlemlemiş ve bu mineral arayanlar için iyi bir ipucu olmuştur. Ancak, 18. yüzyıl kimyacıları bu bakımdan bakırın, boraksın esas bileşeni olduğu şeklinde yanlış bir düşünceye sevk etmiştir.

İlk kez T. Baron (1747) boraksın sal sedativumun (borik asidin) bir bileşeni ve alkali bir tuz olduğunu göstermiş, fakat bu husus aynı konuda çalışanlar tarafından kabul edilmemiştir.

Saf olmayan bor ilk defa, aynı zamanda ve birbirlerinden habersiz olarak Humry Davy tarafından İngiltere'de ve J. L. Gay-Lussac ile L. J. Thenard tarafından Fransa'da 1808 yılında elde edilmiştir. Davy 1807'de koyu renkli yanıcı maddeyi, suyla nemlendirilmiş borik asidin elektriklenmesinde negatif yüzeyde elde etmişti ve

30 Haziran 1808’de yeni ayrıştırılmış alkali metal potasyumla borik asidin altın bir tüpte ısıtılarak boru elde ettiğini rapor etmiştir. Benzer bir deneme Fransız Akademisinde 21 Haziran 1808’de Gay-Lussac ve Thenard tarafından rapor edilmiş ve onlar bu maddenin ‘bor’ olarak adlandırılmasını teklif etmişlerdir. 1812 yılında Davy, bu ürünün reaktif tabiatı bakımından diğer metallere nazaran ‘karbon’a daha çok benzediğini görerek bu elementin ‘boron’ olarak adlandırılmasını teklif etmiştir.

H. Maissan 1892’de yukarıda belirtilen şekilde elde edilen borun % 50 oranında saf olduğunu göstermiştir. Yaptığı yoğun çalışmalarla H. Maissan, borik oksidi magnezyumla indirgemeyi bulmuş ve bu şekilde bor saflığını % 95’e çıkarmıştır. Bu orandaki numunelere aynı işlemi tekrarlayarak % 98,3’lük bir saflık elde etmiştir. Yüksek saflıktaki bor ilk defa 1909 yılında E. Weintraub tarafından Moissan borunun arkta ergitilmesiyle elde edilmiştir. Weintraub ayrıca bor triklorür ve hidrojen karışımı, su soğutmalı bakır elektrotlar arasındaki arkta geçirerek en yüksek saflıktaki bor elde etmiştir. Bu proses şimdi % 99.999 saflıkta bor üretecek kapasitededir.

1812 yılında J. Davy, eşit hacimde amonyak ve bor triflorür birimlerinin katı $H_3N.BF_3$ ’ü meydana getirdiğini bulmuştur. Bu da bir elementin ilk bilinen koordinasyon bileşiğidir. 1824’de J. J. Berzelius ilk defa borik asiddeki oksijen oranını doğru olarak saptamıştır. 1912’de A.Stook ilk defa sadece hidrojen ve bor’dan meydana gelen gerçek bileşikler hazırlayarak, potansiyel olarak organik kimya kadar geniş, kovalent kimyasında çok büyük ve yeni bir saha açmıştır. Yapısal ve teorik olarak bu bileşiklerin durumları 30 - 40 yıl sonra tam olarak anlaşılmıştır[13].

1935 yılı itibari ile bor çeliklerde kullanılmaya başlanmıştır. 1941 yılında Jominy Testinin bulunuş ile de borun çeliklerde kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır.

2.2 Borun Elde Edilmesi ve Saflaştırılması

Saf olmayan element borun 1808 yılında Day-Luccas ve Thenard tarafından elde edilmesi ve 1909 yılında Weintraub tarafından saflaştırılması arasından yüz yıl geçmiştir. Yüksek saflıkta bor elde etmenin güçlüğü sadece analitik zorluklardan değil, borun hem amorf hemde en az dört çeşit çok bileşenli kristal şeklinde bulunabilmesinden kaynaklanır.

Element, indirgenme için gerekli yüksek sıcaklıkta oldukça fazla şekilde reaktiftir. Yüksek stabilitedeki ve aktif olmayan borun bileşikleri çok sık meydana gelir ve bunları bordan hemen ayırmak oldukça güçtür[13].

Çizelge 2. 1. de bor mineralleri (silis ihtiva etmeyen) ve Çizelge 2. 2. de ise silis ihtiva eden bor mineralleri verilmektedir. Borun 230 çeşit mineralleri olduğu bilinmektedir. Çizelge 2. 1. ve Çizelge 2. 2. de bunlardan bazıları verilmektedir.

Çizelge 2. 1. Bor mineralleri (Silis ihtiva etmeyen)

İSMİ	FORMULÜ
1. Yapısında Su Bulunan Boratlar	
Kernite (Rasorite)	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Tincalconite (Mohavite)	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Borax (Tincal)	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Sborgite	$\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Ezcurrite	$\text{Na}_4\text{B}_{10}\text{O}_{17} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Probertite (Kramerite)	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Ulexite (Hayesine, Franklandite)	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Nobleite	$\text{CaB}_6\text{O}_{10} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Gowerite	$\text{CaB}_6\text{O}_{10} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Frolavite	$\text{Ca}_2\text{B}_4\text{O}_8 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Colemanite	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Meyerhofferite	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Inyoite	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 13\text{H}_2\text{O}$
Priceite	$\text{Ca}_4\text{B}_{10}\text{O}_{19} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
(Pandermitte, Cryptomorphite)	
Tertschite	$\text{Ca}_4\text{B}_{10}\text{O}_{19} \cdot 20\text{H}_2\text{O}$
Ginarite	$\text{Ca}_2\text{B}_{14}\text{O}_{23} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Pinnoite	$\text{MgB}_2\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Paternoite	$\text{MgB}_8\text{O}_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Kurnakovite (triclinic)	$\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$
Inderite (Lesserite)(Manolinic)	$\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$
Preobrazhenskite	$\text{Mg}_3\text{B}_{10}\text{O}_{18} \cdot 4 \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$
Hydroboracite	$\text{CaMgB}_6\text{O}_{11} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Inderborite	$\text{CaMgB}_6\text{O}_{11} \cdot 11\text{H}_2\text{O}$
Kahborite (Hemtzite)	$\text{KMg}_3\text{B}_{11}\text{O}_{19} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$
Larderellite	$(\text{NH}_4)_2\text{B}_{10}\text{O}_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Ammoniobarite	$(\text{NH}_4)_2\text{B}_{10}\text{O}_{16} \cdot 5 \frac{1}{3}\text{H}_2\text{O}$
Veatchite	$\text{SrB}_6\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
P-Veatchite	$(\text{Sr, Ca})\text{B}_6\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Çizelge 2. 1. (Devam) Bor mineralleri (Silis ihtiva etmeyen)

İSMİ	FORMÜLÜ
2..Boratlar (hidroksilli ve/veya diğer tuzları ihtiva eden)	
Teepleite	$\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{NaCl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Bandyite	$\text{CuB}_2\text{O}_4 \cdot \text{CuCl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Hilgardite (Monoclinic)	$3\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 2\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Parahilgardite (triclinic)	$3\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 2\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Boracite	$\text{Mg}_5\text{B}_{14}\text{O}_{26} \cdot \text{MgCl}_2$
Fluoborite	$\text{Mg}_3(\text{BO}_3)(\text{F}, \text{OH})_3$
Hambergite	$\text{Be}_2(\text{BO}_3)(\text{OH})$
Sussexite Series Sussexite	$(\text{Mn}, \text{Zn})(\text{BO}_2)(\text{OH})$
(Ascharite Camsellite)	$\text{Mg}(\text{BO}_2)(\text{OH})$
Szaibelyite	$\text{Mg}(\text{BO}_2)(\text{OH})$
Roweite	$(\text{Mn}, \text{Mg}, \text{Zn})\text{Ca}(\text{BO}_2)_2(\text{OH})_2$
Seamanite	$\text{Mn}_3(\text{PO}_4)(\text{BO}_3)3\text{H}_2\text{O}$
Wiserite	$\text{Mn}_4\text{B}_2\text{O}_5(\text{OH}, \text{Cl})_4$
Lüneburgite	$\text{Mg}_3\text{B}_2(\text{OH})_6(\text{PO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Cahnite	$\text{Ca}_2\text{B}(\text{OH})_4(\text{AsO}_4)$
Sulfoborite	$\text{Mg}_6\text{H}_4(\text{BO}_3)_4(\text{SO}_4)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Johachidolite	$\text{H}_6\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Al}_4\text{F}_5\text{B}_6\text{O}_{20}$
3. Borik Asid halindeki mineral	
Sassolite	H_3BO_3
4. Su ihtiva etmeyen boratlar	
Jeremejewite (Eichwaldite)	AlBO_3
Kotaite	$\text{Mg}_3(\text{BO}_3)_2$
Nordenskiöldite	$\text{CaSn}(\text{BO}_3)_2$
Rhodizite	$\text{NaKLi}_4\text{Al}_4\text{Bi}_3\text{B}_{10}\text{O}_{27}$
Warwickite	$(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{TiB}_2\text{O}_6$
Ludwipite Series	
Ludwipite (Ferroludwipite, vonsenite)	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{FeBO}_5$
Paigeite	$(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{FeBO}_5$
Pinakiolite	$\text{Mg}_3\text{Mn}_2\text{B}_2\text{O}_{10}$
Hulsite	$(\text{Fe}, \text{Ca}, \text{Mg})_4(\text{Fe}, \text{Sn})_2$
5. Borflörür Halindeki Mineraller	
Avogadrite	B_2O_{10}
Ferruccite	$(\text{K}, \text{Cs})\text{BF}_4$
	NaBF_4

Çizelge 2. 2. Borosilikat mineralleri

İSMİ	FORMÜLÜ
Axitine	$2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2(\text{Fe, Mn})\text{O} \cdot 4\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{SiO}_2$
Bakerite	$8\text{CaO} \cdot 6\text{H}_2\text{O} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$
Cappelenite	$\text{Ba, Y, H, B, Si, O}$
Caryocerite	$\text{Th, Ce, La, Nd, Pr, Y, Ca, H, F, Si, O}$
Danburite	$\text{CaO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
Datelite	$2\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
Dumortierite	$8\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$
Grandidierite	$11(\text{Al, Fe, B})_2\text{O}_5 \cdot 7(\text{Mg, Fe, Ca})\text{O} \cdot 2(\text{H, Na, K})_2\text{O} \cdot 7\text{SiO}_2$
Homilite	$2\text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
Howlite	$4\text{CaO} \cdot 5\text{H}_2\text{O} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
Hyalotekite	$16(\text{Pb, Ba, Ca})\text{O} \cdot \text{F} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
Kornerupine	$8\text{MgO} \cdot 6(\text{Al, B})_2\text{O}_3 \cdot 7\text{SiO}_2$
Manandonite	$7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{Li}_2\text{O} \cdot 12\text{H}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$
Malanocerite	$\text{Ce, Nd, Pr, La, Y, Ca, H, F, B, Si, O}$
Sapphirine	$5\text{MgO} \cdot 6(\text{Al, B})_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
Searlesite	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$
Serendibite	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CaO} \cdot 4\text{MgO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$
Tourmaline	$\text{Al, Mg, Fe, Mn, Ca, Na, K, Li, H, F, B, Si, O}$
Tritomite	$\text{Th, Ce, La, Nd, Pr, Y, Fe, Ca, H, F, B, Si, O}$
Vesuvianite	$\text{Al, B, Fe, Ca, Mg, H, Si, O}$

Borun bileşiklerinden ayrılmasıyla ilgili dört ana yöntem vardır.

1. Metaller ile indirgeme
2. Elektrolizle indirgeme
3. Uçucu borun bileşiklerinin hidrojenle indirgenmesi
4. Bor bileşiklerinin termal bozunması

Her yöntem özel amaç için ayrı ayrı önemlidir, fakat yüksek saflıkta borun hazırlanmasında en etkili olanı sıcak filament üzerinde hidrojen gazı vasıtasıyla bor tribromürün indirgenmesidir.

2.2.1. Metallerle indirgeme

Boru bileşiklerden elde etmek için çok sayıda reaksiyon vardır, ancak nadiren % 95'in üzerinde saflıkta ve çoğunlukta amorf olan bor elde edilir. Bor kaynağı olarak genellikle boraks, borik asit, bor halojenür veya metal floroborat genellikle kullanılır. Kullanılan metaller Li, Na, K, Be, Mg, Ca, Al, Fe, Zn ve Hg'dir. Karbon, silikon, fosfor da indirgen olarak kullanılır.

Alkali metallerin 350 °C'nin üzerinde bor bileşikleriyle reaksiyonu kuvvetli ekzotermiktir, fakat ürün saf değildir (% 30 - 90). Bununla birlikte % 98 saflığa sodyumun bor halojenürlerle veya floroboratlara reaksiyonuyla ulaşılabilir. Geçmişte en çok kullanılan genel yöntem magnezyumun borik asitle verdiği şiddetli ekzotermik reaksiyon ve bunu takiben asidik suyla yıkamadır. Dikkatlice istenen şartlara % 95 - 98 saflıkta bor elde edilebilir.

Bor, B_2O_3 'ün CaC_2 veya WC redüksiyonuyla veya BN'nin sodyum formatla reaksiyonuyla elde edilir. Bor ve/veya boratlar borhidratların inorganik tuz çözeltilerinin ($LiBH_4 + FeCl_3$ gibi) reaksiyonuyla elde edilirler.

2.2.2. Elektrolizle indirgeme

Ergitilmiş boratların veya floroboratların metal ve karbon elektrotlar arasında elektrolize ile çeşitli amorf tuz bor elde edilir. Bor direk olarak elde edilmez, elektrokimyasal proseste ele geçen aktif metal ile boratın kimyasal reaksiyonu sonucu elde edilir. Elektrolitik olarak % 99,5 saflıkta ticari bor, Cooper'in çalışmasıyla, oksijenden arıtılmış ergimiş $KCl + KBF_4$ 'den elde edilmiştir, fakat sodyum tuzlarının banyoda olması istenmeyen bir husustur.

Elektrolitik prosesle büyük miktarlarda bor elde etmek, filament prosesine göre çok daha ucuzdur, ancak iki dezavantajı vardır. Bunlar, ürün toz halindedir ve birçok amaç için saflığı yeterli değildir. Batch proses için şu banyo uygulanır; 14 kg elektrolit, ağırlıkça % 70 $KCl +$ % 12 KF , % 17,8 KBF_4 , % 0,2 H_2O 'dan hazırlanır.

700 - 800 °C de bir manol metal anot iyice öğütölmüş grafit katot ve 550 A (80 AM²), 5 - 6 V kullanarak 3,5 saat elektroliz edilerek bor elde edilir. Akım verimliliği % 74'tür. Enerji tüketimi 55 KW Saat/1 Kp üründür. Daha sonra yıkanan ürün % 94 - 96 saflıktadır[13].

Daha saf kristal bor, ticari miktarda üretebilme için aşağıda belirtilen yöntemler kullanılır.

2.2.3. Uçucu bor bileşiklerinin hidrojen ile indirgenmesi

Serbest enerji hesaplamaları borik asit, boratlar, bornitrür gibi uçucu olmayan bileşiklerin hidrojenle indirgenmesi bor meydana getirmemektedir. Hidrojenle indirgenecek maddeler hemen hemen bor-trihalojen ürünlerle sınırlanmıştır. Halojenür bileşiklerinden tribromürün bulunması ve indirgenmesi triklorüre göre daha kolaydır. Serbest enerji hesaplamaları, BF₃'ün sıcaklık gereksinimin pratikte uygulanabilecek sıcaklığın çok üzerinde olduğunu göstermiş, BI₃'ün ise hem pahalı hem de yeterli saflıkta bulunamaması, uygulamalarda tatminsizlik oluşturmuştur.

Üç ana tip reaktör kullanılmaktadır. a) Elektrik ark veya kıvılcım, b) Sıcak tüp, c) Sıcak filament. Bu üç sisteminde başarıyla çalışmasına rağmen, büyük miktarda yüksek saflıkta bor hazırlamasında sıcak filamentteki sistem tercih edilmektedir[13].

Sıcak filament metotla elde edilen borun kristal şekli birçok değişkene bağlı olmakla beraber, en önemlisi işlemin hangi sıcaklıkta yapıldığıdır. Kristalleşme sıcaklıkla artar, trihalojenler konsantrasyonu ve tribromür yerine triklorür kullanılmasıyla azalır. Bu değişkenler uygulandığında üründe keskin veya kesikli değişiklikler olmaz. Ancak sıcaklık artırıldığında amorf toz (600 - 800 °C) kütleli amorf (850 - 1000 °C) ve sonra α - rhombohedral kristale (~1000 °C), β - rhombohedral kristale (1100 - 1200 °C), tetragonal kristale (1150 - 1300 °C) ve tetragonal III kristale (1280 - 1500 °C) dönüşür[13].

2.2.4. Bor bileşiklerinin termal bozunması

Bor hidrürlerin ve halojenürlerin sıcaklıkta bozunmasında yüksek saflıkta bor hazırlanabilir. Borun diğer bileşiklerin bozunmasında zorluklar vardır ve nadiren saf bor elde edilir. Stock, ilk defa bor bileşiklerinden sıcaklık bozunmasıyla bor elde etmiş, ancak hidrürlerin hazırlanmasının zorluğu ve pahalılığına, bunların zehirliliğini ve hava ile şiddetli reaksiyonunu ilave edersek ticari saflıkta borun bu yolla elde etmenin neden geliştirilmediği anlaşılmış olur.

2.3. Borun Kimyasal Yapısı ve Özellikleri

Bor periyodik sırası 5, atom ağırlığı 10,81 olan metal, ametal karışımı bir elementtir. Ergime sıcaklığı 2090 ± 20 °C ve kaynama noktası 2550 °C ve yarı iletken bir elementtir. Doğada genelde beyaz ve beyaza yakın renkte bulunmaktadır. Bor bileşikleri insanlık tarihinin en eski teknolojilerinden günümüze kadar kullanılmıştır. Günümüzde kullanım alanları çok daha fazla gelişmektedir, özellikle 400'den fazla endüstriyel alanlarda uygulama alanı ve 230 çeşit bor minerali olduğu bilinmektedir. Bor, karbon ve silisyum elementlerine benzerliği en fazla olan elementtir[14,15,16]. 9,3 mohs sertlik değeri ile elmastan sonra en sert elementtir(Çizelge 2.3.).

Çizelge 2. 3. Bor ve bazı bileşiklerinin sertlikleri[14]

Malzeme	Mohs Sertliği
Bor	9,3
Bor Karbür	9,32
Bor Nitrür	9,34
Elmas (Standart)	10

Çizelge 2. 4. Borun kristal şekilleri ve parametreleri[14]

Kristal Şekli	Kafes Parametresi (°A) a = b	Kafes Parametresi (°A) c
Tetragonal	8,13	8,57
Hegzagonal	9,54	11,98

Bor elementi doğada serbest olarak bulunmaz, yapay bor ise amorf ve kristal yapıda olmak üzere iki şekilde elde edilir. Amorf bor $2,34 \text{ gr/cm}^3$ yoğunlukta siyah ya da kahverengi toz şeklinde, kristal bor ise $2,33 \text{ gr/cm}^3$ yoğunlukta parlak siyah renkte, sert ve kırılğan yapıdadır. Kristal bor hekzagonal ve tetragonal kristal kafes yapısına sahiptir(Çizelge 2. 4.). Su ile 100°C üzerinde, oksijenle 700°C de, hidrojenle 840°C de reaksiyona girer[16].

Bor elementi % 19,57 oranında B^{10} ve % 80,43 oranında B^{11} izotoplarından meydana gelmektedir. Borun büyük bir nötron absorpsiyon kesiti vardır. Bu değer B^{10} izotopu için 40.10 barn, B^{11} izotopu için ise 0,75 barn'dır. B^{10} izotopu nükleer reaktörlerin kontrolü ve nükleer radyasyondan korunma nedeni ile büyük önem taşımaktadır[17].

Borun elektrik iletkenliği oda sıcaklığında çok düşük olmasına rağmen ısıtıldıkça süratle artar. Bu metallere has bir özellik değildir. Borun metalik özelliklerinin de çok az olmasından dolayı bir ametaldir. Ergimiş iken soğutulduğunda çok sert ve kırılğan bir madde halini alır. Alevde yeşil renkte yanar[16].

Bor çok sayıda mineralle bileşik halinde bulunur. Bor mineralleri genellikle bor oksitleri içerirler ancak ticari anlamda bunlardan en çok üç tanesi dünyada önemli sayılmaktadır. Bunlardan büyük miktarda "Na" içeren ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) Tinkal (Boraks) cevheri, büyük miktarda "Ca" içeren bileşiklerine ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) Kolemanit cevheri ve büyük miktarda "Na - Ca" içeriğinde olana ise ($\text{Na Ca B}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) Üleksit cevheridir[18].

Bor teknolojik ve endüstriyel uygulamalarda daima çeşitli bileşikler ve bor kimyasalları şeklinde olur. Bor alaşımları borun geçiş elementleri olan Demir, Nikel ve Kobalt ile yapmış olduğu alaşımlardır. Bor ve bor bileşikleri makine ve metalürji sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bor demir esaslı malzemelerde alaşım elemanı olarak kullanıldığında borun % 0,1'in altında olması gerekir. Çünkü bu oranın üzerinde bor miktarları çeliklerin yüksek sıcaklıkta kırılmalara, dökme demirde ise zararlı çatlamalara neden olur. Bor çeliklerde % 0,007 oranına kadar sertleştirme derinliğini artırır, dökme demirlerde ise % 0,005'e kadar grafitin çekirdeklenmesine ve yapıyı üniform şekilde dağılmasına sebep olur[16].

Boratlar yüksek sıcaklıkta düzgün, yapışkan, koruyucu ve temiz, çapaksız bir sıvı oluşturma özelliği nedeniyle özellikle demir dışı metal sanayinde cüruf oluşturu ve ergitmeyi hızlandırıcı madde olarak kullanılır. Bor bileşikleri elektrolitik kaplama sanayinde banyo bileşimlerinde kullanılmaktadır. Borik asit nikel kaplamada, fluoboratlar ve fluoborik asitler ise kalay, kurşun, bakır, nikel gibi demir dışı metal banyo bileşimlerinde kullanılmaktadır. Metal oksitlerin yüksek sıcaklıklarda bor içinde kolaylıkla eriyebilmesi, çelik endüstrisinde fluorit yerine borun daha uygun olarak kullanılmasını sağlar. Yüksek fırınlarda boratlar, asitliğin azalmasına ve refrakterlerin daha uzun ömürlü olmasını sağlar[15].

Takım çeliklerine bor ilâvesi sertleşme kabiliyetini arttırmaktadır. Paslanmaz çeliğe ppm mertebesinde bor ilavesi, kaynak kabiliyetini, sürünme direncini, taneler arası korozyon direncini, nötron absorpsiyon kapasitesini arttırmakta, sıcak yırtılmaları önlemektedir.

Bor elementi ayrıca çeliklerin yüzey kaplama (Borlama) işleminde de kullanılmaktadır. Alaşımlı çeliklerdeki borlu tabaka, Fe atomunun yerini alan alaşım elementlerinin yerini de içermektedir. Bu tür çelikler FeB ve Fe₂B bileşiklerinin yanında, alaşım elementlerine bağlı olarak Cr₂B, CoB, CoB₂, TiB₂, NiB₂ kafes parametresi $10,62 \pm 0,02 \text{ Å}$ olan kübik yapılu M₂₃(B,C)₆ (M=Metal) bileşiklerini de içerirler. Bor aynı zamanda çelik içerisinde bulunan V₄C₃, NbC gibi karbürlerle de eriyik halde bulunabilir. Ni ve Cr, Fe₂B'de Fe atomlarının yerini alarak erir.

Bazı süper alaşımlarda az oranda bor ilavesi (0 - 50 ppm) malzemenin yüksek sıcaklık davranışına olumlu yönde etkisi vardır. Yüksek hız çeliklerine, kullanımda sertleşebilen ve ısıtıl işlem görebilen çeliklere bor ilavesi özellikle sürünme mukavemetini arttırmaktadır. Krom, Krom-Nikel-Kobalt gibi yüksek sıcaklık çeliklerine az miktarda bor ilavesi bu malzemelerin ömrünü arttırmaktadır[17].

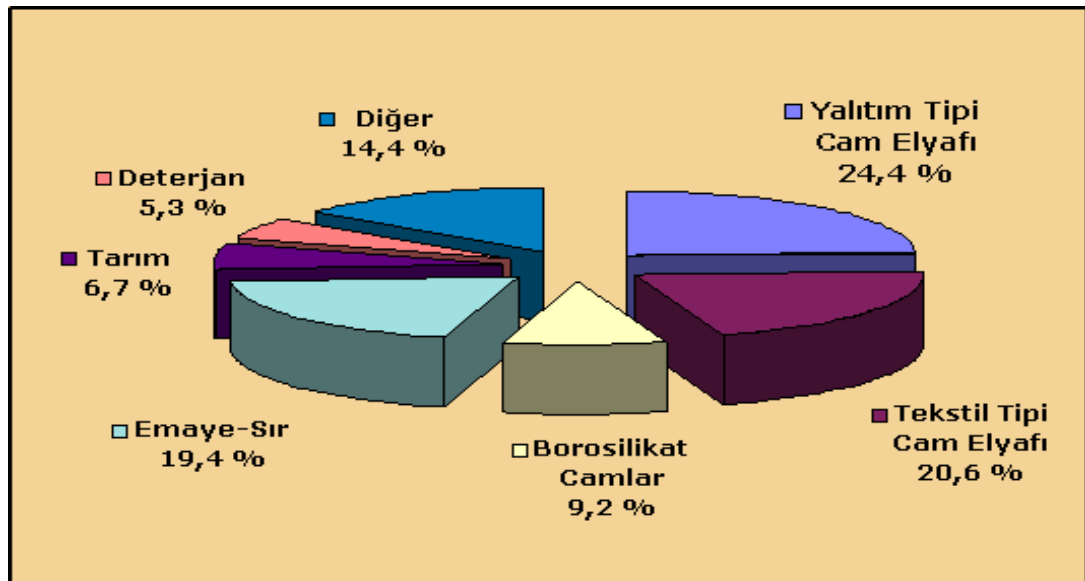
2.4. Borun Genel Kullanım Alanları

Bor mineralleri kullanım alanı olan sektörlerde çoğunlukla bor kimyasalları şeklinde tüketildiği gibi konsantre bor olarak doğrudan da tüketilmektedir[19]. Bor ürünleri uzay ve hava araçları, nükleer uygulamalar, askeri araçlar, yakıtlar, elektronik ve iletişim sektörü, tarım, cam sanayi, kimya ve deterjan sektörü, seramik ve polimerik malzemeler, nanoteknolojiler, otomotiv ve enerji sektörü, metalürji ve inşaat gibi 500'e yakın alanda kullanılmaktadır[2]. Birçok alanda tüketilen bor ürünlerinin % 85'e yakını (Çizelge 2. 5.) cam (yalıtım tipi cam elyafı, tekstil tipi cam elyafı, borosilikat cam ve panel cam), seramik – frit, tarım ve deterjan sektörlerinde yoğunlaşmıştır.

Çizelge 2. 5. Dünya bor tüketiminin sektörel dağılımı [19].

Kullanım Alanı	Dağılım	
	Miktar (Bin Ton B ₂ O ₃)	% Pay
Yalıtım Tipi Cam Elyafı	440	24,4
Tekstil Tipi Cam Elyafı	370	20,6
Borosilikat Camlar	165	9,2
Emaye-Sır	350	19,4
Tarım	120	6,7
Deterjan	95	5,3
Diğer Alanlar	260	14,4
Toplam	1.800	100

Borun genel kullanım alanlarının Şekil 2.1. de % dağılım oranları görülmektedir.



Şekil 2. 1. Bor tüketiminin nihai kullanım alanlarına göre dağılımı[19]

2.4.1. Cam elyafı

Hafifliği, fiyatının düşüklüğü, gerilmeye olan direnci ve kimyasal etkilere dayanıklılığı nedeniyle plastiklerde, elyaf v.b. de, lastik ve kâğıtta yer edinmiş olan cam elyaf, kullanıldığı malzemelere sertlik ve dayanıklılık kazandırmaktadır. Böylece sertleşmiş plastikler otomotiv, uçak sanayilerinde, çelik ve diğer metallerin yerini almaya başlamıştır. Ayrıca spor malzemelerinde de (kayaklar, tenis raketleri v.b.) kullanılmaktadır.

2.4.2. Borosilikat camlarda kullanımı

Camın ısıya dayanmasını, cam imalatı sırasında çabuk ergimesini ve kristalleşmesinin 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 % 23'ü bor oksitten oluşmaktadır. Örneğin Pyrex'de % 13,5 B_2O_3 vardır. Genellikle cama boraks, kolemanit, borik asit halinde karma olarak ilave edilmektedir.

2.4.3. Seramikte kullanımı

Emayelerin akışkanlığını ve doygunlaşma ısını azaltan bor oksit % 20'ye kadar kullanılabilir. Özellikle emayeye katılan hammaddelerin % 17 - 32'si borik oksit olup, sulu boraks tercih edilir. Bazı hallerde bor oksit veya susuz boraks da kullanılır. Metalle kaplanan emaye onun paslanmasını önler ve görünüşüne güzellik katar. Çelik, alüminyum, bakır, altın ve gümüş emaye ile kaplanabilir. Emaye asite karşı dayanıklılığı artırır. Mutfak aletlerinin çoğu emaye kaplamalıdır. Banyolar, kimya sanayi teçhizatı, su tankları, silahlar v.b. de kaplanır.

2.4.4. Tarımda kullanımı

Bor mineralleri bitki örtüsünün gelişmesini artırmak veya önlemek maksadıyla kullanılmaktadır. Bor, değişken ölçülerde, birçok bitkinin temel besin maddesidir. Bor eksikliği görülen bitkiler arasında yumru köklü bitkiler (özellikle şeker pancarı) kaba yoncalar, meyve ağaçları, armut, zeytin, kahve, tütün ve pamuk sayılmaktadır.

Bu gibi hallerde susuz boraks ve boraks pentahidrat içeren karışık bir gübre kullanılmaktadır. Bu da, suda çabuk eriyebilen sodyum pentaborat ($\text{NaB}_5\text{O}_8 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) veya disodyum okta boratın ($\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}$) tarım ürününün üzerine püskürtülmesi suretiyle uygulanmaktadır. Bor bitkilerin köklerinin ve yapraklarının gelişmesine, çiçek açmasına, polen üretimine, filizin gelişmesine, tohum ve meyve vermesine yardımcı olur.

2.4.5. Temizletme ve beyazlatma sanayinde kullanımı

Sabun ve deterjanlara mikrop öldürücü (jermisit) ve su yumuşatıcı etkisi nedeniyle % 10 boraks dekahidrat ve beyazlatıcı etkisini artırmak için toz deterjanlara % 10 - 20 oranında sodyum perborat katılmaktadır.

2.4.6. Nükleer uygulamalar

Atom reaktörlerinde borlu çelikler, bor karbürler ve titanbor alaşımları kullanılır. Paslanmaz borlu çelik, nötron absorbanı olarak tercih edilmektedir. Yaklaşık her bir bor atomu bir nötron absorbe etmektedir. Atom reaktörlerinin kontrol sistemleri ile soğutma havuzlarında ve reaktörün alarm ile kapatılmasında (B^{10}) bor kullanılır. Ayrıca, nükleer atıkların depolanması için kolemanit kullanılmaktadır.

2.4.7. Enerji üretimi ve ısı depolama

Bor, demir ve nadir toprak elementleri kombinasyonu % 70 enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu güçlü manyetik ürün; bilgisayar disk sürücüler, otomobillerde doğru akım motorları ve ev eşyaları ile portatif güç aletlerinde kullanılmaktadır. Son yıllarda, borların piller/aküler de kullanılması ile maliyetler düşürülmüş ve çevre dostu piller/aküler üretilmeye başlanmıştır.

2.4.8. Borlu katı yakıtlar/Yakıt hücreleri/(Fuel cells)

Son günlerde sodyum borohidritinin kullanıldığı, sodyum borohidrattan enerji üreten yakıt hücreleri ile 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.

2.4.9. Sağlık

BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) kanser tedavisinde kullanılmaktadır. Özellikle, beyin kanserlerinin tedavisinde hasta hücrelerin seçilerek imha edilmesine yaraması ve sağlıklı hücrelere zararının minimum düzeyde olması nedeniyle tercih nedeni olabilmektedir. Metabolizmadaki bor, kalsiyum, magnezyum ve fosfor dengesini ayarlar. Sağlıklı kemiklerin oluşumuna, kasların ve beyin fonksiyonlarının gelişimine yardım eder.

2.4.10. Otomobil hava yastıkları, antifriz

Bor hava yastıklarının hemen şişmesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Çarpma anında, elementel 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

2.4.11. İnşaat-Çimento sektöründe kullanımı

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

2.4.12. Ahşap koruma

Bakteri ve çürümeye karşı koruyucu ve alev geciktirici olarak kullanılmaktadır.

2.4.13. Yanmayı önleyici (Geciktirici) maddeler

Borik asit ve boratlar selülozik maddelere, ateşe karşı dayanıklılık sağlarlar. Tutuşma sıcaklığına gelmeden selülozdaki su moleküllerini uzaklaştırırlar ve oluşan kömürün yüzeyini kaplayarak daha ileri bir yanmayı engellerler. Bor bileşikleri plastiklerde

yanmayı önleyici olarak giderek artan oranlarda kullanılmaktadır. Bu amaç için kullanılan bor bileşiklerinin başında çinko borat, baryum metaborat ve amonyum fluoborat gelmektedir.

2.4.14. Füze / Uçuş yakıtları

Bor kimyasalları özellikle füze yakıtı olarak kullanılmaktadır. Sodyum tetraborat, özel uygulamalarda yakıt katkı maddesi olarak kullanılmaktadırlar.

2.4.15. Atık temizleme

Sodyum borohidrat, atık sulardaki civa, kurşun, gümüş gibi ağır metallerin sulardan temizlenmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Diğer kullanım alanları ise; Fiber Optik, Kozmetik, Kauçuk ve Plastik Sanayi, Fotoğrafçılık, Patlayıcı Maddeler (havai fişek vb.), Antifrizler, Hidrolik Yağlar, Petrol Boyaları, Yanmayan ve Erimeyen Boyalar, Tekstil Boyaları, Zımpara ve Aşındırıcılar, Kompozit Malzemeler, Manyetik Cihazlar, İleri Teknoloji Araştırmaları (moleküler biyoloji vb.), Mumyalama ve diğer birçok alanda kullanılmaktadır. Bazı özel bor kimyasalları için kullanım alanları ise Çizelge 2. 6. da verilmektedir.

Çizelge 2. 6. Bazı özel bor kimyasalları için kullanım alanları

Ürün	Kullanım Alanları
Amorf Bor	Askeri Piroteknik
Kristalin Bor	Nükleer Silahlar ve Nükleer Güç Reaktörlerinde Muhafaza
Bor Halidleri(tuzları)	İlaç Sanayi, Katalistler, Elektronik Parçalar, Bor Flamentleri ve Fiber Optikler
Özel Sodyum Boratlar	Fotoğrafçılık Kimyasalları, Yapıştırıcılar, Tekstil “Finishing” Bileşikleri, Deterjan ve Temizlik Malzemeleri, Yangın Geciktiricileri, Gübreler ve Zırai Araçlar
Fluoborik Asit	Kaplama Solüsyonları, Fluoborat Tuzlar, Sodyum Bor Hidrürler
Trimetil Borat	Sodyum Bor Hidrürler
Sodyum Bor Hidrürler (Sodyum Borohidrat)	Özel Kimyasalları Saflaştırma, Kâğıt Hamurunu Beyazlaştırma, Metal Yüzeylerin Temizlenmesi
Bor Esterleri	Polimerizasyon Reaksiyonları için Katalist, Polimer Stabilizatörleri, Yangın Geciktiricileri

2.5. Türkiye’de Bor Maden Yatakları ve Tarihçesi

1850’li yılların başında, Bebek’te mermer işleri ile uğraşan Polonya’lı mülteci Henri Groppler eski ortağı fransız mühendis Camille Desmazes’e alçı taşından yapıldığını sandığı heykeller hediye eder. Heykellerde yüksek oranda boraks olduğunu anlayan fransız Camille Desmazes, ortağı ile birlikte Türkiye’de boraks aramaya başlar ve Balıkesir ili Susurluk ilçesi yakınlarındaki Sultançayırı mevkiinde

bulurlar. Buldukları “Pandermit” adı verilen bir bor minerali türüdür. Esasen bu saha 13 ve 14. Yüzyıllarda romalılar tarafından işletilmiş bir sahadır. Bu pandermitin işletilmesi için 1856 yılında Sultandan 37 dönüm arazi üzerine “alçıtaşı” madeni çıkarmak üzere 20 sene süreli işletme izni alırlar.

Bor Osmanlı döneminde yabancı firmalar tarafından “Alçıtaşı” olarak işletilmiştir.

1950 yılında Sultançayırdaki cevherler Desmond Aber Smith’den 3/12002 sayılı Kararname ile bu yıllarda dünya tekeli firma durumundaki Borax Consolidated Ltd’ye devredilmiştir. Borax Consolidated 1951 yılında 11.000 ton’a yakın ihracat yapsa da 1954 yılında bor cevherinin tükendiğini ileri sürerek, Sultançayı Ocağını kapatır. Ancak pasalardaki düşük tenörlü cevherin satışını 1961 yılına kadar sürdürerek Türkiye’deki faaliyetlerine devam eder.

14 Haziran 1935 tarihinde kurulan Etibank’da Bor Madenleri ile ilgisini sürdürmektedir.

MTA’nın Kütahya/Emet yöresinde Tersiyer Linyit Arama adı altında yürüttüğü çalışmalarda kolemanit yatağı bulunur. İlk jeolojik tespitlerden sonra alınan ruhsat 15 Mayıs 1958 de Etibank’a devrolunur. Etibank ruhsatı aldıktan sonra 1958 ve 1959 yıllarında aramalarını sürdürürken üretime de geçer.

Borax Consolidated Ltd. 1955 yılında yabancı sermayeyi teşvik kanunlarından yararlanmak için Türk Boraks Madencilik Anonim Şirketini kurar. Bu tarihten sonra Türkiye’de bu yeni şirket vasıtasıyla madencilik faaliyetlerini yürütecektir. Bu şirketin hisselerinin % 94’ü Borax Consolidated, % 2 si Türk hissedarlar, % 4’ ü İngiliz hissedarlara verilmiştir. Bu arada başka bir kararname ile iki yabancı şirkete daha arama ve işletme izni verilir. Bunlardan biri American Potash And Chemical Co., diğeri ise Ugine Kuhlman’dır.

Eskişehir Kırka’da bor tuzu aramaları maden arama ruhsatı sahibi yerli madenciler adına 1950 li yılların sonlarına doğru MTA uzmanlarınca başlatılmıştır. Bu aramalar devam ederken 1961 Ağustos ayında Borax Consolidated Ltd. Maden Dairesinden kendi adına bir arama ruhsatı alarak hissesinin büyük bir kısmı kendisine ait Türk

Boraks Madencilik A.Ş.'ne devir ederek aramaları başlatır. Şirket ürettiği TİNKAL ürününün fiyatlarını önce 30 - 35 \$/ton'a bilahere 17 \$/ton'a kadar düşürmüştür. Şirketin Maden Dairesine ruhsat için müracaatları eksiklikler nedeniyle neticelenmez. Aynı şekilde aldıkları 6 ruhsattan 5'i iptal edilir. Bu boraks yataklarının ruhsatı 1968 yılından itibaren Etibank'a geçmiştir[19].

Etibank tarafından bu yatakları işlemek için gerekli çalışmalara 1969 yılında başlanarak 1970 yılında tesisler kurulmaya başlanmıştır.

Balıkesir'in Bigadiç ilçesi yakınlarında da 1950 yılından beri bor tuzu (Kolemanit ve Üleksit) üretilip ihraç eden Türk Girişimcileri (Bortaş, Ali Şayakcı, Rasih-İhsan, Yakal Madencilik) vardı. 1976 yılında burada faaliyet gösteren Fransız KEMAD Ltd. (Kimya Endüstri Madenleri Ltd. Şti.) nin saha sınır anlaşmazlığı nedeniyle Bakanlar Kurulu Kararıyla 13/02/1976 da Tülü Açık İşletmesinin bulunduğu sahanın Etibank'a verilmesi ile Etibank bölgede madencilik faaliyetlerine başlamış ve 08/04/1976 tarihinde Emet Müessesesine bağlı "Etibank Bigadiç Madenleri İşletmesi Şantiyesi" kurulmuştur.

Bursa Mustafa Kemalpaşa'da Kestelek civarındaki bor tuzu yatakları (Kolemanit) MTA Enstitüsünün Linyit Araştırmaları esnasında 1954 yılında bulunmuştur. Diğer tüm bor tuzu sahalarının imtiyazı hakkında olduğu gibi 4 Ekim 1978 tarih ve 2172 sayılı Devlet'çe işletilecek Madenler ile ilgili yasa gereği 21/08/1979 tarihinde saha o tarihteki adı ile Etibank'a devredilmiştir[19,20].

Bugün için bu görev 1983 yılında çıkartılan 2840 sayılı Devletçe işletilecek madenler kapsamında Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından yürütülmektedir. 1978 öncesi gerek yabancı gerekse yerli özel sektör, Bor üretim faaliyetlerinde, katma değeri fazla olan rafine ürün üretmek için herhangi bir yatırım yapmadan ürünleri ham cevher olarak satma yoluna gitmişlerdir[20].

2.6. Türkiye’de Bor Üretimi

Bor mineralleri; bünyelerinde değişik oranlarda bor oksit (B_2O_3) içeren mineraller olup; ülkemizde yaygın olarak bulunan bor mineralleri; tinkal, kolemanit ve üleksit'dir. Dünya kolemanit rezervinin tamamına yakını ülkemizde bulunmaktadır[20]. Bu mineraller sırasıyla sodyum, kalsiyum ve sodyum + kalsiyum bazlı bor bileşikleridir(Çizelge 2. 7.).

Çizelge 2. 7. Türkiye’de bulunan bor mineralleri[20]

Tinkal	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$
Kernit	$Na_2 B_4O_7 \cdot 4H_2O$
Kolemanit	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$
Üleksit	$Na Ca B_5O_9 \cdot 8H_2O$
Datolit	$Ca_2B_2O_5 \cdot Si_2O_5 \cdot H_2O$

Dünya bor tüketimi, krizin dünya ekonomilerinin hemen hemen bütün sektörlerinde kendisini hissettirmesine ve dolayısıyla son çeyrekteki talep daralmasına rağmen, 2008 yılında büyümesini sürdürmüştür.

2.7. Dünya Bor Rezervleri

Dünyada önemli bor yatakları Türkiye, Rusya ve ABD’de olup dünya ticari bor rezervleri 3 bölgede toplanmaktadır. Bunlar;

1. ABD Kaliforniya eyaletinin güneyinde yer alan ‘‘Mojave Çölü’’
2. Güney Amerika’da yer alan And Kemer
3. Türkiye’nin de yer aldığı ‘‘Güney – Orta Asya Orojenik Kemer’’

Dünya toplam bor rezerv miktarında Türkiye % 72’lik pay ile ilk sırada yer alırken, onu % 8 pay ile Rusya ve % 7 pay ile ABD takip etmektedir. 2008 yılında dünya bor talebinin yaklaşık % 37’sinin Eti Maden, % 30’unun RT Borax tarafından karşılandığı, geri kalan yaklaşık % 33’ünün de diğer üreticiler tarafından karşılandığı tahmin edilmektedir(Çizelge 2. 8).

Çizelge 2. 8. Dünya bor rezervleri[19,20]

Ülke	Görünür Ekonomik Rezerv	Muhtemel Mümkün Rezerv	Toplam Rezerv	Toplam Rezervdeki Pay (%)
Türkiye	227.000	624.000	851.000	72,20
A.B.D.	40.000	40.000	80.000	6,80
Rusya	40.000	60.000	100.000	8,50
Çin	27.000	9.000	36.000	3,10
Arjantin	2.000	7.000	9.000	0,80
Bolivya	4.000	15.000	19.000	1,60
Şili	8.000	33.000	41.000	3,50
Peru	4.000	18.000	22.000	1,90
Kazakistan	14.000	1.000	15.000	1,30
Sırbistan	3.000	0	3.000	0,30
Toplam (Bin Ton)	369.000	807.000	1.176.000	100,00

Çizelge 2. 8. da belirtilen sonuçlara göre Türkiye dünya bor rezervinin % 72’lik pay ile ilk sırada gelmektedir. Dünya toplam bor rezervi ve bugünkü tüketim değerleri dikkate alındığında, dünyada çok uzun yıllar bor cevheri sıkıntısı yaşanmayacağı görülmektedir.

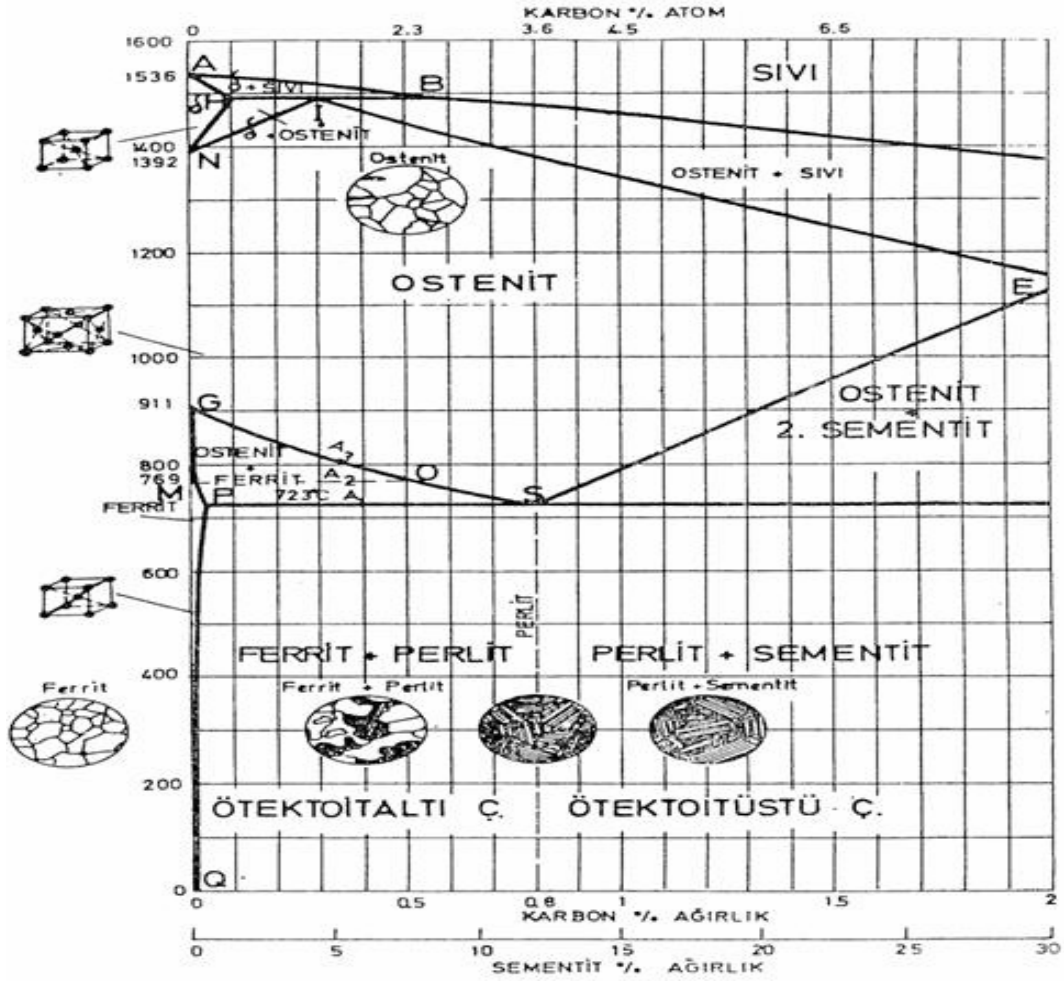
3. ÇELİK VE ÇELİĞİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Demir esaslı malzemelerin endüstride yaygınca kullanılmasının başlıca nedenleri, doğada diğer metallere nazaran çok bulunması, üretimde diğer malzeme üretimlerine nazaran daha az enerji gerektirmesi ve özelliklerin istekler doğrultusunda ve geniş sınırlar içerisinde iyileştirilebilmesidir. Özellikler şekil verme, alaşımlama ve ısıt işlemlerle, diğer metal malzemelerde ulaşılamayacak ölçüde değiştirilebilir. Hemen hemen tüm tanınan teknolojik yöntemlerle şekillendirilmesi ve istenilen biçime getirilmesi mümkündür.

Dünyada 2008 yılı içerisinde üretilen çelik miktarı 1.307 milyon tondur. Çin 502 milyon ton, Japonya 119 milyon ton, ABD 91,5 milyon ton çelik üretimi gerçekleştirmiştir. Türkiye’de ise 2008 yılı içerisinde üretilen çelik miktarı 26.8 milyon tondur[21].

3.1. Fe – C Denge Diyagramı

Demir esaslı malzemelerde genellikle bulunan ve en önemli olan alaşım elemanı karbondur. Genel olarak, teknikteki alışılmış soğuma koşullarında demir-karbon alaşımları Fe-Fe₃C sisteminde yarı kararlı olarak katılaşır. Fe-C kararlı sisteminde katılaşma, yalnızca çok yüksek karbon miktarlarında, silisyum gibi grafit teşkil ettirici alaşım elemanlarının etkisiyle ve çok yavaş soğumada meydana gelebilir. Sekil 3. 1.’de görülen Demir-Karbon denge diyagramına göre, demir esaslı alaşımsız malzemeler şöyle gruplanabilir.



Şekil. 3. 1. Demir – Karbon denge diyağramı[22,23]

Dökümden sonra kararlı ya da yarı kararlı ötektiği içeren demir esaslı malzemeler, dökme demir olarak tanımlanabilir. Karbon miktarının alt sınırı yaklaşık olarak % 2'dir, ancak alaşım elamanlarının etkisiyle daha düşük değerlere kayabilir. Genel kullanımda, daha çok ötektik altı alaşımlar önem taşır.

Dökümden sonra ilave bir işlem yapılmaksızın dövülebilen demir esaslı malzemeler, çelik olarak tanımlanır. Alaşımsız olarak kullanılabilen çeliklerde karbon miktarının üst sınırı yaklaşık %1,5 kadardır. Ancak, istisnai olarak ya da alaşımlı çeliklerde sınırlı miktarda Fe-Fe₃C ötektiği (Ledeburit) de bulunabilir. Örnek olarak, ledeburitik kromlu çelik X 210 Cr 12 ya da yüksek alaşımlı hız çelikleri gösterebilir.

Karbon miktarının biraz değişmesiyle dökme demirde çeşit değişmesi pek söz konusu değil iken, çelik malzemelerde karbon miktarına bağımlı olarak pek çok sayıda çelik türü elde edilir. Karbon miktarının belirli sahalarında, belirli kullanım alanı mevcuttur. Ancak, burada da bazı özel durumların olduğunu da belirtmek gerekir.

Ayrıca alaşım elementi içermeyen ve karbon miktarı yaklaşık olarak % 0,6 ila 1,2 arasında çelikler, alaşımsız takım çeliği olarak tanımlanır. % 0,6'dan az karbonlu çelikler yapı çelikleri ya da konstrüksiyon çelikleri olarak belirtilir. Genel yapı çelikleri, haddelenmiş hadde ya da yumuşak tavlanmış, normal tavlanmış veya benzeri ısıtıl işlem görmüş olarak alıcıya teslim edilebilir. Çeliği kullanan, gerekli şekillendirme işlemlerinden sonra, uygun olan diğer ısıtıl işlemleri uygulayabilir. Malzeme seçiminde de, bu işlemlere uygun tercih öncelikle yapılır. Örneğin, sementasyon yapılacaksa karbon miktarı % 0,10 ila 0,22 arasında olan sementasyon çeliği ya da ıslah yapılacaksa karbon miktarı % 0,22 ila 0,60 arasında olan ıslah çeliği tercih edilir. Yapı çeliklerinde, % 0,04 ila 0,6 arasında değişen karbon miktarı ile özellikle yüksek dayanıklılık, yüksek süneklik ya da iyi şekillendirilebilme (özellikle kaynak kabiliyeti ve şekil değişebilirlik) istenir. Çok az karbon miktarlı çelikler, yumuşak demir olarak da adlandırılır. Bunlar makine imalatında konstrüksiyon malzemesi olarak pek az kullanılırlar, daha çok elektroteknikte, örneğin röle demiri olarak önemi vardır[22 - 25].

3.2. Alaşımsız Çelikler

Sade karbonlu çelikler esas olarak demir – karbon alaşımlarıdır. Bunlar karbon içeriklerinin aralıklarına göre yumuşak veya az karbonlu çelikler (0,1 – 0,25 % karbon), orta karbonlu çelikler (0,25 – 0,6 % karbon), yüksek karbonlu çelikler (0,6 – 0,8 % karbon) ve karbon takım çelikleri (0,8 – 1,1 % karbon) şeklinde alt sınıflara ayrılırlar. Karbon çeliklerinde karbona ilave olarak % 1,65'den az manganez, % 0,60'dan az silisyum, % 0,60'da az bakır ve belirlenmiş limitlerde (çok az) fosfor ve kükürt bulunur. Nikel, krom ve molibden gibi kalıntılar da küçük miktarlarda bütün

karbon çeliklerinde bulunurlar. Mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için karbon çeliklerine bazen bor eklenir.

Sade karbonlu çeliklerde, karbon miktarının artışı ile, ötektoit altı çeliklerde ferrit + perlit karışım yapısındaki perlit oranı artmakta ve % 0,8 C değerinde çelik % 100 perlitik bir yapıya sahip olmaktadır. Ötektoidüstü çeliklerde ise yapıda perlitin yanı sıra sementit bulunmaktadır.

Sade karbonlu çeliklerin tüm özellikleri içerdikleri karbon miktarına bağlı olarak sahip oldukları yapılarla doğrudan ilişkilidir. Artan karbon miktarı ile çeliklerde sertlik, akma gerilmesi, çekme dayanımı artarken, süneklik (% uzama ve % kesit daralması) ve darbe dayanımı azalır. Dolayısıyla, karbon miktarının artması çeliklerin plastik şekil alma kabiliyetlerini düşürür. Buna karşılık çeliklerde karbon miktarının artması su alma kabiliyetini artırır ve ters etki olarak kaynak kabiliyetini düşürür[23,24]. Alaşımsız çeliklerin kimyasal bileşim aralığı Çizelge 3. 1’de verilmektedir.

Çizelge 3. 1. Alaşımsız çeliklerin kimyasal bileşim aralığı

Element	Az Karbonlu Çelik	Orta Karbonlu Çelik	Yüksek Karbonlu Çelik	Karbon Takım Çelikleri
Karbon (%)	0.1 – 0.25	0.25 – 0.60	0.60 – 0.80	0.80 – 1.1
Manganez (%)	0.3 – 0.6	0.4 – 0.9	0.5 – 1.0	0.7 – 1.4
Silisyum (%)	0.1 – 0.25	0.20 – 0.40	0.3 – 0.6	0.4 – 0.6
Fosfor (%)	0.045 max.	0.045 max.	0.045 max.	0.035 max.
Kükürt (%)	0.045 max.	0.045 max.	0.045 max.	0.035 max.

3.2.1. Yumuşak veya az karbonlu çelikler

Yumuşak veya az karbonlu çelikler dünya çelik üretiminin en büyük kısmını oluştururlar. Özellikle yassı ürünler ile inşaat sektörü ve temel yapılarda kullanılan çelik çubuk ve profiller az karbonlu çeliklerdir. Az karbonlu çelikler düşük karbon içeriklerinden dolayı ısıtılma işlemiyle kütle olarak sertleştirilemezler. Ancak sementasyon, nitrasyon vb. işlemleriyle yüzeyleri sertleştirilebilir. Az karbonlu çeliklerin sertleştirilmeleri genellikle soğuk işlemle yapılmaktadır.

Az karbonlu çeliklerin (özellikle çok düşük karbon içerenler), mekanik özelliklerinde yaşlanma nedeniyle önemli değişimler meydana gelebilmektedir. Düşük karbonlu çeliklerde iki tip yaşlanma görülebilir. Birincisi çökme tipi yaşlanmadır. Karbon ve azotun ferrit içinde çözünürlüğü artan sıcaklıkla artar. Bu özellikten yararlanılarak; solüsyona alma işlemi sonunda aşırı doymuş ferrit fazında karbür ve/veya nitür çökmesi olur. Böylece çeliğin mekanik özelliklerinde değişimler meydana gelir. İkinci tip yaşlanma deformasyon yaşlanmasıdır ve çeliklerde çökme yaşlanmasından daha önemlidir. Ferrit içinde çözünen karbon ve azot plastik deformasyona neden olan dislokasyon merkezlerinin hareketini engeller. Süreksiz akma görülür. Bu durumda malzemenin mekanik özelliklerinde değişimler gözlemlenebilir. Çeliğe süreksiz akma gerilmesini aşacak bir gerilme uygulanıp yükleme sıfıra indirilirse sürekli akma tekrar görülmeye başlar[22 - 24]. Bazı alaşımsız çeliklerin (sade karbonlu çeliklerin) tipik mekanik özellikleri ve kullanım alanları Çizelge 3. 2.'de verilmektedir.

Çizelge 3. 2. Bazı alaşımsız çeliklerin (sade karbonlu çeliklerin) tipik mekanik özellikleri ve kullanım alanları[22]

AISE/S AE Singesi	Nominal Bileşim % ağı.	İşlem Durumu	Akma Gerilmesi MPa	Çekme Dayanımı MPa	Kopma Uzaması %	Tipik Kullanma Alanı
1010	0.10 C 0.45 Mn	Sıcak hadde. Soğuk hadde.	170 - 310 159 - 262	276 – 414 290 - 400	28 – 47 30 - 45	Sac, şerit, tel, vida, çivi
1020	0.20 C 0.45 Mn	Hadde. halde Tavlanmış (870 °C)	330 295	450 395	36 37	Levha ve yapı elem., dişli
1040	0.40 C 0.75 Mn	Hadde. halde Tavlanmış (790 °C) Su+Temp (650°C)	415 355 495	620 520 670	25 30 28	Şaft, dişli, dingil, cer kancası, boru, çivi
1060	0.60 C 0.75 Mn	Hadde. halde Tavlanmış (790 °C) Su+Temper (650°C)	480 370 525	815 625 800	17 23 23	Yay, dişli, dövme kalıpları, vagon tekerlekleri
1080	0.80 C 0.75 Mn	Hadde. halde Tavlanmış (790 °C) Su+Temper (650°C)	585 375 600	965 615 890	12 25 21	Zimba, yaylı çalgı teli, makas bıçağı, hel. yaylar
1095	0.95 C 0.40 Mn	Hadde. halde Tavlanmış (790 °C) Su+Temper (650°C)	570 380 550	965 655 895	9 13 21	Tel, matkap freze bıçakları, kesme bıçakları

Soğuk çekilmiş ince çelik saclarda temper haddesi yapılarak süreksiz akma giderilir. Ancak yaşlanma süresi içinde kullanılmayan bu tip malzemeler, özellikle presleme ve derin çekme işlemlerinde kullanıldıklarında malzemede tekrar süreksiz akma görüleceğinden yüzey buruşuklarına sahip hatalı ürünler ortaya çıkar. Bu hataları önlemek için yaşlanmayan çelik üretmek amacıyla özellikle, azotu bağlamak için çeliklere Alüminyum ilave edilerek söndürülmüş çelikler veya yaşlanmayan çelikler üretilir.

Deformasyon yaşlanmasının bir diğer şekli de 200 °C gibi yüksek sıcaklıklarda yapılan deformasyon sırasında görülür. Buna da dinamik deformasyon yaşlanması denir.

3.2.2. Orta karbonlu çelikler

Orta karbonlu çelikler karbon miktarlarına bağlı olarak orta derecede mekanik özelliklere sahiptirler. Isıl işlemlerle yeteri derecede sertleşebilirler. Kullanma yerleri önem arz eder. Özellikle makine imalat sanayinde tercih edilen çeliklerdir. İşlenebilme kabiliyetleri, şekil alma kabiliyetleri ve kaynak kabiliyetleri az karbonlu çeliklere nazaran düşüktür. Kaynak sırasında meydana gelen kontrolsüz ısıl etkiler çeliğin yapısal değişiminin de kontrolsüz olmasına neden olur[22 - 24].

3.2.3. Yüksek karbonlu çelikler ve karbon takım çelikleri

Yüksek karbonlu çelikler ve karbon takım çelikleri ısıl işlemlerle sertleştirilmeleri ile oldukça yüksek sertlik kazanırlar. Bu nedenle aşınmaya dayanıklı ve kesici özelliğe sahiptirler. Bu özellikleriyle karbon takım çeliğidirler ve takım çeliği olarak kullanılırlar. İşlenme kabiliyetleri, şekil alabilme kabiliyetleri ve kaynak kabiliyetleri düşüktür. Kaynakları ancak özel tekniklerle yapılabilir[23, 24].

3.3. Alaşımli Çelikler

Alaşımsız çeliklerde bulunanlardan daha yüksek oranda alaşım elementi içeren çelik türüdür. Alaşım elementinin türüne ve miktarına bağlı olarak alaşımlama ile çeliğin sertliği, katı eriyik sertleşmesi ve/veya sementitten daha kararlı alaşım karbürlerin çökmesi ile artırılmakta, sertleşme kabiliyeti ve korozyon direnci gibi çeşitli özellikleri de geliştirilmektedir. Alaşımli çeliklerde karbon çelikleri için belirtilen değerlerin üzerinde manganez, silisyum veya bakır bulunur veya bir veya daha fazla alaşım elementleri belirlenmiş aralıklarda bulunur. Yüksek alaşımli çelikler bulundurdıkları temel alaşım elementi veya elementlerine göre sınıflandırılırlar[24,25]. Örnek olarak nikel çelikleri, krom çelikleri, krom – vanadyum çelikleri, molibden çelikleri v.b.

Alaşım elementleri çeliklerin mekanik ve işleme özelliklerini geliştirir. Alaşımli çelikler, karbonun dışında;

- a.) % 2 – 5 oranlarında alaşım elementi içeren az alaşımli çelikler
- b.) % 5 ‘den daha fazla alaşım elementi içeren yüksek alaşımli çelikler
- c.) Mikroalaşımli çelikler olarak sınıflandırılırlar.

3.3.1. Az alaşımli çelikler

Alaşımli çelikler alaşım elementi ve/veya elementlerinin toplamı % 5’den az olan, genellikle su verilip temperlendikten sonra (ıslah edilmiş durumda) kullanılan çeliklerdir. Mukavemet, tokluk, korozyon direnci gibi özelliklerin ön plana çıktığı servis koşulları için daha ucuz olan alaşımsız çeliklere tercih edilirler. Kalın kesitli yapı ve makine elemanlarının az alaşımli çeliklerden imal edilmesi, ısıt işlemler kolaylığı da sağlamaktadır. Az alaşımli çelikler, alaşım çeliklerine kıyasla daha yüksek sertleşme kabiliyetine ve ısıt işlemler sırasında daha düşük çatlama ve çarpılma eğilimine sahiptirler. Az alaşımli çeliklerin bileşiminde ana alaşım elementi olarak manganez, nikel, krom, molibden ve volfram (tungsten) bulunur. Bu çeliklere

vanadyum, kobalt, bor, bakır, alüminyum, kurşun, titanyum ve niyobyum gibi alaşım elementleri de ilave edilebilir.

3.3.2. Yüksek alaşımlı çelikler

Alaşım elementi ve/veya elementlerinin toplamı % 5'den yüksek olan çeliklerdir. ‘‘Paslanmaz Çelikler’’ ve ‘‘Takım Çelikleri’’ bu gruba giren en önemli çelik türlerine örnek olarak verilebilir.

3.3.3. Mikroalaşımlı çelikler

Son kırk yılın üretilen miktar açısından en önemli gelişimini gösteren mikroalaşımlı çelikler, öncelikle yapı çeliklerinin dayanım kapasitelerinin yetersizliği nedeniyle geliştirilmiştir. Mikroalaşımlı çeliklerin, yüksek akma mukavemetlerinden dolayı yapı ağırlığı büyük ölçüde azaltılmıştır. Mikroalaşımlama terimi, çok düşük oranlarda Nb, V ve Ti ilavesi anlamına gelir[26,27].

Az karbonlu, bileşiminde düşük oranlarda alaşım elementi bulunan ve genellikle yassı mamul üretiminde kullanılan çelikler girmektedir. Yüksek mukavemetli az alaşımlı (HSLA) çelikler, çift fazlı (DF) çelikler, arayer atomsuz (IF) çelikler mikroalaşımlı çeliklere örnek olarak verilebilir.

Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler, genellikle sade karbonlu çeliklere oranla daha yüksek dayanımlı modern yapı çelikleri olarak tanınırlar. Bu çelikler yüksek dayanım ve diğer özelliklerini etkili bir alaşımlama ve kontrollü haddeleme ile kazanırlar. Nb, V ve Ti gibi mikroalaşım ilaveleri ve kontrolü haddeleme ve dayanımları, kalıntı denetimi ile toklukları artırılmıştır[28]. Bu mikroalaşım elementlerine alüminyumu da dahil edebiliriz. Çünkü alüminyum nitrür normalize edilmiş ve sıcak işlenmiş çeliklerde tane boyutu kontrolü için kullanılıyor. Başlangıçta bu çelikler haddelenmiş veya normalleştirilmiş olarak kullanılmakta iken, bugün bu çelikler kontrollü haddelenmiş plakalar, levhalar, profiller, dövme ürünleri olan çubuklarda kullanılmaktadır[29,30].

Basınçlı kap, boru donanımı ve -55 °C'ye kadar sıvı gazların depolanması ve taşınmasında kullanılan diğer konstrüksiyon elemanlarının üretiminde, düşük karbonlu (C en fazla % 0,15) ve yaklaşık % 1,4 Mn, % 0,7 Ni ve % 0,03 Nb içeren mikroyapılı yapı çelikleri uygundur. Bu çelikler, normal tavllanmış halde iyi bir süneklik karakteristiği gösterirler[31].

Mukavemet ve tokluk açısından büyük çaplı borulara olan talep son zamanlarda artmıştır. Termomekanik haddelenmiş mikroyapılı çeliklerden üretilen bu borular mekanik özellikler bakımından yüksek mukavemet, düşük darbe geçiş sıcaklığı ve iyi kaynaklanabilme özelliği ile kullanım esnasında çalışma şartlarına oldukça dayanıklı malzeme konumuna gelmiştir[32].

Termomekanik haddelenmiş çeliklerde mikroyapıda istenen özelliklerin sağlanması haddelme işlemi ile çok ilgilidir. Mikroyapıda, çelik özelliklerinde istenen yüksek mukavemet, süneklik ve kaynaklanabilirlik için ferrit tane boyutunu küçültmek en etkili yöntemdir[38]. Ferrit tane boyutu küçüldükçe akma ve çekme mukavemeti, çentik darbe ve kırılma tokluğu ile sertlik değerleri artmaktadır. Akma ve çekme mukavemetindeki artış, tane boyutunun küçülmesi sonucunda toplam tane sınır yüzeyinin artarak dislokasyon hareketlerini engellemesinden kaynaklanmaktadır.

Azalan perlit oranıyla tokluk değerleri yükselirken, düşmesi gereken çekme ve sertlik değerlerinde de artış olur. Bu uyumsuzluk, mikroyapı elementlerinin çökelti oluşumuyla karbonu bağlaması ve çökelti sertleştirilmesi yoluyla da çekme mukavemeti ve sertlik değerlerini artırmasından kaynaklanmaktadır[32].

3.4. Bazı Çelik Tipleri ve Çelik Kaliteleri

Endüstrinin gelişmesiyle farklı özellik kalitelerinde çok sayıda çelikler geliştirilmiş ve üretilmektedir. Bunlardan bazı çelik tipleri ve bazı çelik kaliteleri aşağıda verilmektedir.

3.4.1. Yapı çelikleri

Kimyasal etkilere dayanıklılık ve imalat sırasında sertleştirme işlemi öngörülme-yen genel olarak konstrüksiyon çelikleri olarak düşünölen yapı çelikleri, kullanım yerine göre seçilmelerinde, öncelikle akma gerilmesi değeri göz önünde bulundurulur. Bunun yanında yeterli süneklilik ve gerektiğinde tokluk aranır. Bu arada söz konusu çeliklerin en başta kaynak olmak üzere, talaş kaldırma, soğuk şekil verme (örneğin bükme, zımbalama, derin çekme) gibi bazı imal usulleri ile ilgili teknolojik özellikleri de büyük önem taşıyabilir[33,34].

Çeliklerin kaynak işlemi söz konusu ise, sadece dayanımlarına değil, tokluk özelliklerine göre de seçilmek zorundadırlar. Cıvata, perçin gibi bağlantı biçimlerinde gevrek kırılma ile hemen hemen hiç karşılaşmadığından, malzemenin tokluğu önemli rol oynamaz. Çeliklerin kaynağa uygunluğu için genel bir garanti verilmesi yanıltıcı olabilir. Çünkü konstrüksiyonun kaynak sırasında ve sonrasındaki davranışları malzeme özelliklerinden başka, boyutlar, üretim ve işletme koşulları ile de belirlenir.

3.4.2. Genel yapı çelikleri

Genel yapı çelikleri deyimi çok geniş bir dizi uygulama alanında kullanılan çelikleri kapsar. Değişik ülke standartlarında bunların kapsamı değişik tutulsa da temel yaklaşım bakımından birbirine benzerler. Toplam çelik üretimi içerisinde en büyük paya sahiptirler. Alaşımsız ve kitle çeliğı olarak, sıcak biçimlendirmeden sonra normalleştirilmiş, bazen de soğuk biçimlendirilmiş durumda kullanılırlar. Bu çeliklerden özellikle çekme ve akma dayanımları göz önünde tutularak, örneğın alt yapı, üst yapı, köprü, depolama kabı, taşıt ve makine yapımı gibi çeşitli mühendislik alanlarında yararlanılır.

Genel amaçlı kullanılan genel yapı çelikleri ölkemizde yaygın olarak bilinen DIN 17100 standartlarındaki St simgesi ve N/mm^2 olarak minimum çekme dayanımları ile anılan çeliklerdir. St simgesi daha sonra Fe simgesi ile değişmiştir. Günümüzde

Avrupa standardında simge S ile değişmiştir ve minimum akma gerilmesi N/mm^2 olarak ardından yazılmaktadır(S 275 gibi). Bu standartta çeliklerin deokside edilme durumları; U: deokside edilmemiş, R: yarı deokside edilmiş, RR: tam deokside edilmiş olduğunu gösterir.

Bu çeliklerin en az çekme dayanımları $290 N/mm^2$ 'den $670 N/mm^2$ 'ye, en az akma gerilmeleri de $175 N/mm^2$ 'den $365 N/mm^2$ 'ye kadar değişir. İçyapıları ferritik-perlitiktir. Dayanım değerleri; katı çözelti sertleşmesi, tane inceliği, perlit oranı gibi faktörlerin ortak etkilemesi ile artar[33,34].

3.4.3. İnşaat (Beton) çelikleri

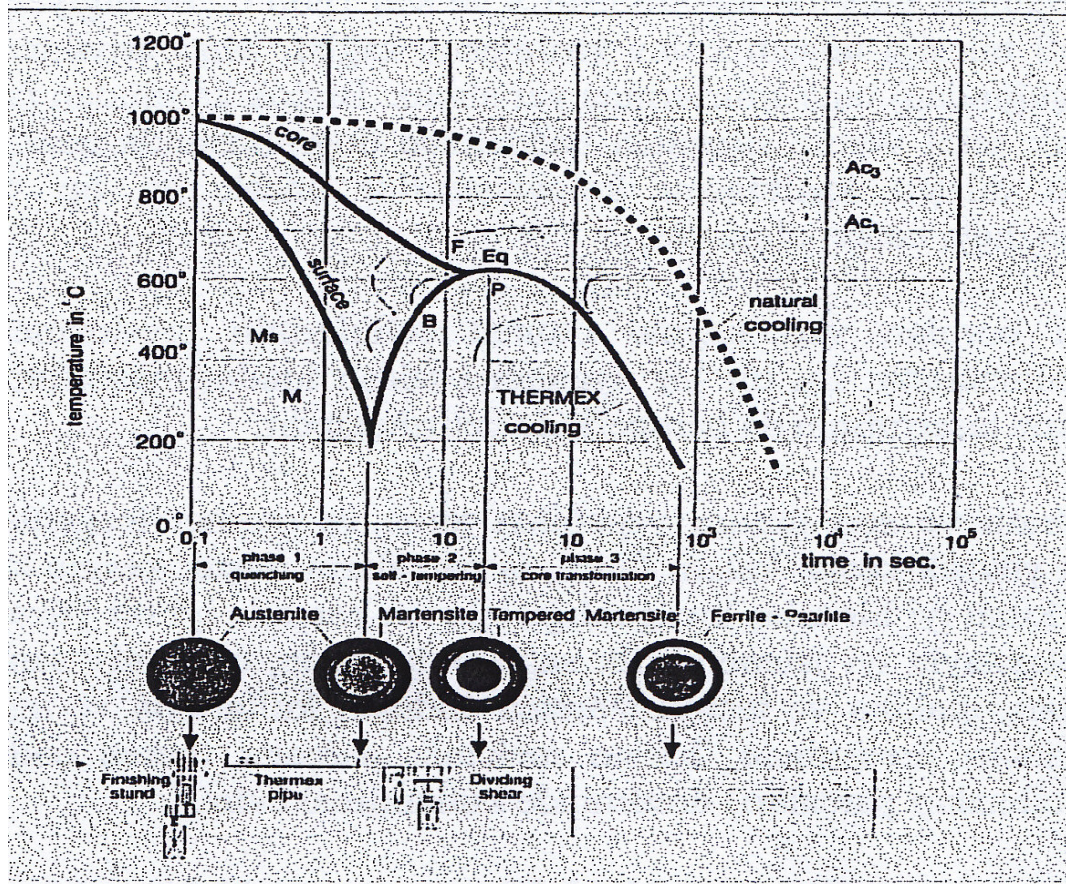
İnşaat çelikleri yapı çelikleri içerisinde en önemli yeri tutar. Türkiye'de inşaat çeliklerinde, geçmiş yıllarda daha çok Alman DIN normlarına uygunluk öngörülüyordu. (DIN 488 ve DIN 1045). Bu standartlardan yararlanılarak TS 708 standardı çıkarılmıştır. Bu standartlarda kısaca; düz yüzeyli çelikler B St 22/34 rumuzu ile ve nervürlü çelikler B St 42/50 rumuzu ile gösterilmiştir. Bunlarda ilk sayı kg/mm^2 olarak minimum akma gerilmesini, son sayı da kg/mm^2 minimum çekme dayanımını ifade etmektedir. Son yıllarda ülkemizde ihracatın da başlamasıyla daha çok İngiliz BS 4448 standardı kullanılmaktadır. Bu standartta kimyasal bileşimlerine ilave olarak kısaca, nervürlü çeliklerde 8 – 16 mm çap için Gr 250 ve 8 – 40 mm çap için Gr 460 kalitesi yer alır. Bu Gr değerleri N/mm^2 biriminden minimum akma gerilmelerini ifade ederler. Çekme dayanımları da akma gerilmelerinin 1.15 katı olması istenir. Yine ülkemizde JIS G 3112 ve ASTM A 615 standartları kullanılırlar. Bunların kalite sınıfları da benzer olarak kimyasal bileşim ve mekanik özelliklere göre tanımlanırlar.

Günümüzde beton çeliklerinden; yüksek akma gerilmesi, iyi kaynak edilebilirlik tokluk ve süneklik aranır. Yüksek akma gerilmesinin diğer özelliklerle birlikte sağlaması klasik yöntemlerle yapılan üretimlerde olanaksızdır. Çeliklerde istenilen bu yüksek kalite özellikleri çeliklere ancak bazı özel işlemlerle kazandırılabilir.

Çeliklerin mekanik özellikleri, kimyasal bileşim ile belli sınırlar içerisinde değiştiğinden, alaşım elementlerinin dizaynı ile mekanik özelliklerinde bazı ayarlamalar yapılabilir. Ancak genel olarak alaşım elementlerinin ilavesi mukavemeti artırırken, süneklikle ilgili istenilen diğer özelliklere ve kaynak edilebilirliğe olumsuz etki ederler.

İnşaat çeliklerinden istenilen mekanik özellikler; klasik üretimlerde, bazı düzenlemelerle, örneğin kimyasal bileşimin niyobyum ve vanadyum gibi elementlerle mikro düzeyde alaşımlandırma ile modifiye edilmesi ile sağlanabilmektedir. Ancak bunlar pahalı veya ilave işlem gerektiren uygulamalardır[35].

Bu iki uygulamaya alternatif olarak geliştirilen yöntem “tempcore” prosesidir. Tempcore prosesinde sıcak haddeden yüzeyde nervürleri işlendikten sonra çıkan çelik çubuk, özel bir soğutma sisteminden geçer. Hızlı soğuma çelik çubuğun yüzey tabakasını martenzite dönüştürür. Soğutma bölgesinden ayrılan çelik çubuğun soğumamış çekirdeğinin ısısı, yüzey tabakası temper sıcaklığına ulaştırır ve yüzey tabakasındaki martenziti temperler. Böylece yüzeyde temperlenmiş martenzit tabakası bulunan iç kısımları beynit, perlit ve ferrit yapıları çelik çubuk elde edilir. Bu yapıyla çelik çubuk; gerekli dayanımın yanında tokluk, süneklik, kaynak edilebilirlik ve kolay bükülebilirlik özelliklerine sahiptir. Ancak hızlı soğumadan dolayı inşaat çeliklerinin yüzeyinde yeterli kalınlıkta oksitlenmeyi koruyucu manyetik kabuk oluşmaz. Bu nedenle inşaat çeliği ürünleri oksitlenmeye duyarlıdır. Şekil 3. 2.’de tempcore prosesin metalürjisi verilmektedir.

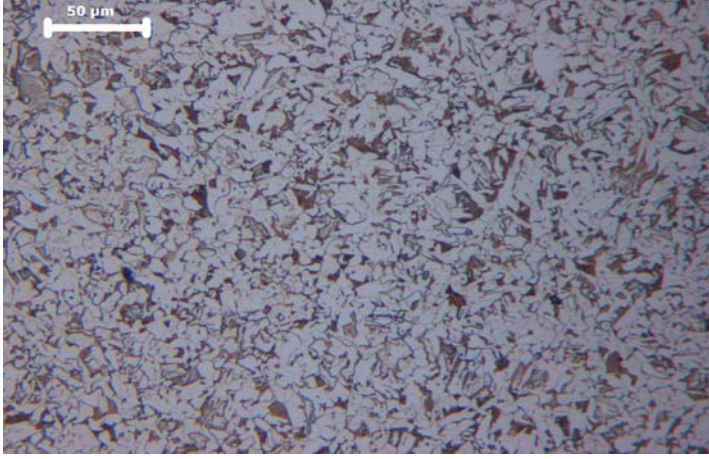


Şekil 3. 2. Tempcore prosesinin metalürjisi[22]

1040 çeliğinin kaynak edilebilirliğinin iyi olmaması nedeniyle Ç1020 çeliğine tempcore yöntemi uygulanarak inşaat çeliği yerine ülkemizde kullanılmaya başlanmıştır.

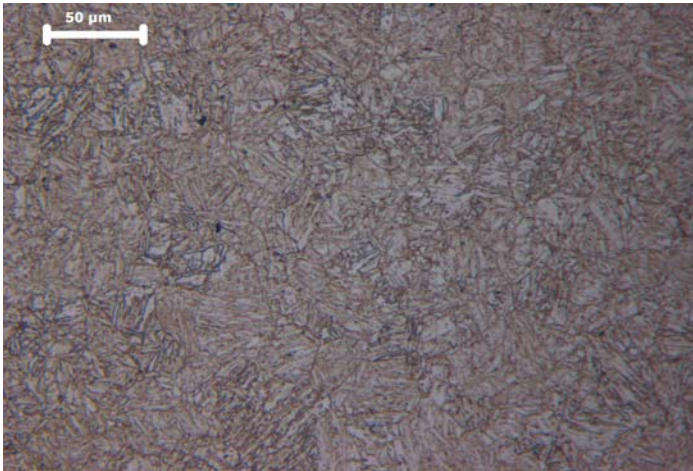
Ege Çelik A.Ş. tarafından 1040 inşaat çeliğinin mekanik özelliklerine eş değer olması için, Ç1020 çeliğine tempcore yöntemi uygulanarak üretilen inşaat çeliğin mikroyapı resimleri görülmektedir. Ç1020 çeliği 1200 °C sıcaklıkta bekletildikten sonra su ile 600 °C'ye kadar hızla soğutulmuştur. 600 °C'den sonra Ç1020 çeliği havada soğumaya bırakılmıştır. Ç1020 inşaat çeliğinin dış kısımlarında martenzit yapı oluşurken, iç kısımlarda ise ferrit ve perlit yapı oluşmaktadır. Tempcore yöntemi ile Ç1020 çeliğinin Akma ve Çekme Dayanımı artırılırken, kaynak edilebilirliği de sağlanmış olmaktadır. Resim 3. 1.'de Ç1020 çeliğinin iç

kısımlarından alınan mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Mikroyapı fotoğraflarında ferrit ve perlit yapının olduğu görülmektedir.



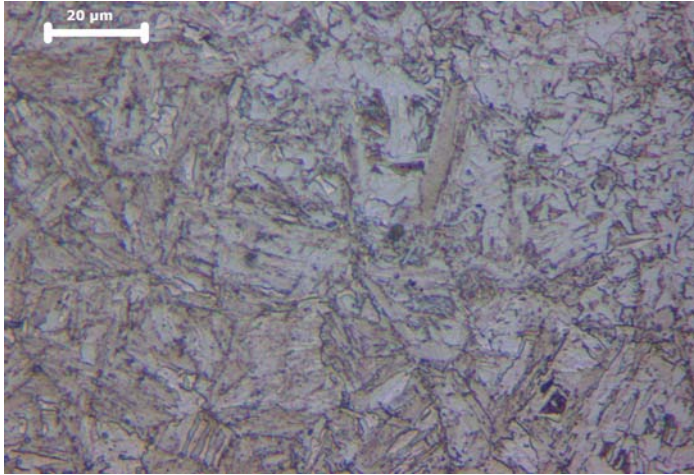
Resim 3. 1. Ç1020 çeliğinin iç kısımlarından çekilmiş mikroyapı fotoğrafı

Resim 3.2.'de tempcore yöntemi uygulanmış Ç1020 çeliğinin yüzeyinden alınmış mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Mikroyapı fotoğrafında su verme işlemi ile hızlı soğutma neticesinde çeliğin yüzeyinin tamamen martenzite dönüştüğü görülmektedir.



Resim 3. 2. Ç1020 çeliğinin yüzey kısımlarından çekilmiş mikroyapı fotoğrafı

Resim 3. 3.'de ise tempcore yöntemi uygulanmış Ç1020 çeliğinin yüzeyde martenzit yapı ile malzemenin iç kısımlarındaki ferrit ve perlit yapı arasındaki geçiş bölgesi görülmektedir. Resim 3. 3.'de martenzit ve perlit-ferrit bir arada görülmektedir.



Resim 3. 3. Ç1020 çeliğinin yüzeydeki martenzit yapı ile merkezde bulunan ferrit ve perlit yapı arasındaki geçiş bölgesinin mikroyapı fotoğrafı

Günümüzde üretimlerin çok önemli kısmını ihraç eden ülkemizdeki inşaat çeliği üreticilerinin çoğu üretimlerinde tempcore prosesini kullanmaktadırlar. Ancak bu prosesin dışında istenilen mukavemeti % 0,2 vanadyum ilavesi ile de sağlayan üretimler de yapılmaktadır.

3.4.4. Otomat çelikleri

Otomat çelikleri (free – cutting steels), genellikle hızlı talaş alma işleminde talaşların kırık çıkması nedeniyle, düşük maliyetle talaşlı imalata olanak sağlayan çeliklerdir. Taşındıkları kolay işlenebilirlik özelliklerinden dolayı, bu çelikler tornalama, dış açma, matkapla delme, ray bağlama gibi talaş kaldırma işlemlerine en uygun çelikler olarak tanımlanırlar. Otomat çelikleri uygulanan ısıt işlemlere göre,

- a-) Isıl işlem uygulanmayanlar (yumuşak otomat çelikleri)
- b-) Isıl işlem uygulananlar
- c-) Islah işlemi uygulananlar

d-) Sementasyon işlemi uygulananlar diye dört gruba ayrılırlar.

Pratik olarak hassas ölçü toleranslarında kullanılması bakımından, otomat çelikleri malzemesi daha ziyade soğuk çekilmiş olarak arza sunulur.

Otomat çelikleri, en az kükürt içeren (% 0,08 – 0,13 S) 15S10 kaliteden en çok kükürt içeren (% 0,34 – 0,40 S) 9SMn36 kaliteye kadar farklı oranlarda kükürt içerirler. Karbon içerikleri de ıslah işlemi uygulananlarda % 0,60 oranlarına kadar çıkabilir. Bazı kalitelerin bileşimlerinde kurşun da vardır (% 0,15 – 0,35).

Yaklaşık % 0,12 kükürt ve düşük karbon içeren ve yarı otomat çeliği olarak adlandırılan çelikler, örneğin 15S10 kalite çeliği, iyi bir işlenebilirlik özelliğinin yanı sıra, sıcak ve soğuk dövme ve zımbalama parçalarının imalatında kullanılmaktadır (örnek: somunlar). Yüksek kükürt içeren örneğin 9SMn28 veya 9SMn36 kalite çeliği, sıcak dövme uygulamasında başarıyla kullanılabilirler[33,34].

Otomat çeliklerinde çeliğin bileşiminde bulunan kükürt ve Mangan 1600 °C’de eriyen MnS(Mangan sülfür) bileşiğini oluştururlar. Bu MnS bileşiği talaşın kolay kırılmasını sağlar. MnS eriyikten birincil olarak ayrıştığından (katılaştığından) tane sınırlarında yer almaz. Birçok kalıntıların farklı olarak şekil değiştirebilir ve sıcak şekil verme sırasında haddeleme doğrultusunda uzar. MnS’ün düşük dayanımından ötürü talaşın kırılmasını kolaylaştırırlar ancak bu tip çeliklerin genel özelliklerinde olumsuzluğa neden olmazlar.

Otomat çelikleri, süratli ve seri üretim yapabilen torna ve otomat tezgahlarında; tezgahın işleme hızına uygun yüksek kesici kalem ömrü, iş parçalarının düşük kesme kuvveti ile kolay işlenmesini olanaklı kılan iyi bir talaş kırılkanlığı, işlenen parçada iyi bir yüzey kalitesi ve dar ölçü toleransları, dolayısıyla iyi işlenebilirlik sağladıklarından, otomotiv sanayi için değişik tür bağlantı elemanları, makine ve teçhizat üreten endüstri kollarında ve inşaat sektöründe, konstrüksiyon elemanları üretiminde, hassas mekanik parçalar üreten endüstri kollarında (optik cihaz ve ölçü cihazları parçaları) üretiminde kullanılmaktadır[33,34].

3.5. Alaşım Elementlerinin Çeliklere Etkisi

Metal malzemelerde, belirli özellikleri elde etmek (kuvvetlendirmek) veya gidermek (zayıflatmak) amacıyla önceden saptanmış miktarlarda bulunması zorunlu olan bileşenlere alaşım elementleri, istenmediği halde üretimden kaynaklanan elementlere yani arıtilamayan elementlere ise empürite ya da katışkı denir. Burada, demir esaslı malzemelerde alaşımlı ile alaşımsız çelik arasındaki anlam farkının tam açıklanması gerekirse, bir alaşımlı çelikte arıtilamayan elementlerle birlikte demir ve karbon (ana alaşım elementi) elementleri de hesaba katılmaksızın, bileşenlerden en az birinin % ağırlık olarak Çizelge 3. 3.'de verilen sınıra ulaşması ya da bunu aşması gerekir. Bu koşulu sağlayan bileşenler çeliğin alaşım elementleri diye nitelendirilir.

Çizelge 3. 3. Çeliklerin alaşımlı sayılabilmesi için içerebilecekleri element miktarlarının alt sınırları (EURE – NORM 20-74)[22,23]

Element	Alt sınır (% Ağırlık)	Element	Alt sınır (% Ağırlık)	Element	Alt sınır (% Ağırlık)
Alüminyum	0,10	Mangan	1,60	Vanadyum	0,10
Bakır	0,40	Molibden	0,08	Volfram	0,10
Bor	0,0008	Nikel	0,30	Zirkonyum	0,05
Bizmut	0,10	Niyobyum	0,05	Diğerleri (Karbon, fosfor, kükürt, azot ve oksijen dışında)	0,05
Kobalt	0,10	Selenyum	0,10		
Krom	0,30	Silisyum	0,50		
Kurşun	0,40	Tellür	0,10		
Lantanitler	0,05	Titanyum	0,05		

Alaşım elementlerinin etkisiyle, başka hiçbir malzemenin özellikleri çeliklerdeki kadar geniş çapta değiştirilemez. Öte yandan çok sık örnekte karşılaşıldığı gibi bunların etkileri toplanabilir olmadığından, çok sayıda alaşım elementinin birlikte bulunması halinde, beklenen özellik değişimleri ancak genel çerçevede ele alınabilir ve bu konuda kesin bir yaklaşım yapılamaz.

Alaşımlı çelikler, alaşım elemanlarının (karbon ve arıtilamayan elemanlar dışında kalan diğerleri) toplam miktarı % 5'den az olanlar düşük alaşımlı çelikler ve alaşım

elemanlarının toplam miktarı % 5'den fazla olanlar yüksek alaşımlı çelikler olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Temelde alaşımsız çeliklere benzer davranışa sahip olan düşük alaşımlı çeliklerin teknik açıdan en belirgin özelliği, sertleşme kabiliyetlerinin daha yüksek olmasıdır. Ayrıca, sertlik, çekme dayanımı, akma sınırı, elastiklik modülü gibi dayanım özellikleri ile ısıya dayanıklılık, meneviş dayanıklılığı gibi karakteristikler yükselirken, genellikle kopma uzaması, kesit daralması, çentik darbe dayanımı gibi değerlerde azalma olur. Alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerde istenilen özelliklerin bulunmaması veya yetersiz olması halinde yüksek alaşımlı çelikler kullanılır. Bu tür alaşımlama, normal sıcaklıklardaki mekanik dayanımın artırılması yanında, öncelikle ısıya, tufallaşmaya ve korozyona dayanım, sıcakta sertlik ve manyetikleşmeme gibi bazı seçilmiş özelliklerin elde edilmesini amaçlar.

Elementlerin çeliğin yapısında tek elementli faz, katı çözelti (katı eriyik) ve intermetalik oluşturması durumunda, malzeme özelliklerini çok farklı şekilde etkiler. Teknikte kullanılan demir esaslı alaşımlarda tek elementli fazlar, yalnızca kurşun ve bakırdan kaynaklanabilir. Bu fazların yaratabileceği olumlu etkiler sınırlı olduğundan, her iki metal de alaşım elementleri arasında önemli bir yer işgal etmezler. Buna karşın, aşağıda belirtilen elementler, katı çözelti ve intermetalik bağlantı meydana getirerek geniş ölçüde özellik değişimlerine yol açabilecekleri için, çeliklerin alaşımlandırılmasında büyük ağırlık taşırlar.

Alaşım elementlerinin demirle katı çözelti oluşturması, atom çaplarının oranı ile kristal yapılarına bağlıdır. Bunlardan Cr, Al, Ti, Ta, Si, Mo, V ve W öncelikle α - demirinde çözündüklerinden dolayı ferrit yapıcılar, Ni, C, Co, Mn ve N ise, benzer nedenle östenit yapıcılar olarak adlandırılır.

İntermetalik bağlantılar, en az iki alaşım elementinin atomları arasında çok büyük kimyasal ilgi bulunması sonucu ortaya çıkarlar. Bileşenlerinden farklı ve karmaşık bir kristal yapıya sahip olup, genellikle çok sert ve gevrekler. Çeliklerde özellikleri genelde iyileştiren teknik açıdan en önemli intermetalik bağlantılar karbür ve nitrür'ler ile hem karbon ve hem de azot içeren karbonitrür'lerdir.

Önemli karbür yapıcı elementler ve bu elementlerin karbür yapma eğilimleri, sıraya göre artar: Mn, Cr, Mo, W, Ta, V, Nb, Zr, Hf, Ti'dur.

Genelde zayıf karbür yapıcılar olan mangan ve krom, demir karbürde (Fe_3C) çözünerek karışık karbürler, örneğin $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$, $(\text{Fe,Mn})_3\text{C}$ ortorombik M_3C karbürleri teşekkül ettirirler. Bunların stabilitesi çok azdır ve yaklaşık 650 °C sıcaklıkta çözünmeye başlarlar. Kromun demirle yaptığı M_7C_3 ve M_{23}C_6 karbürleri, hekzagonal kübik yapılı olan MC (TaC, NbC, VC, TiC, ZrC, HfC) özel karbürler çok yüksek sıcaklıklara kadar stabilitelerini korurlar.

En önemli nitrür yapıcıları; Al, Mo, W, Ta, Cr, Zr, Nb, Ti, V ve B elementleridir. Bu elementlerle AlN, TiN, NbN, ZrN, TaN, VN, W_2N , CrN, Cr_2N , MoN ve BN gibi nitrürler teşekkül eder. Bunlardan kübik yapılı olanları oldukça stabildirler, östenitte bile zor çözünürler, hatta TiN ergiyikte bile stabillitesini korur.

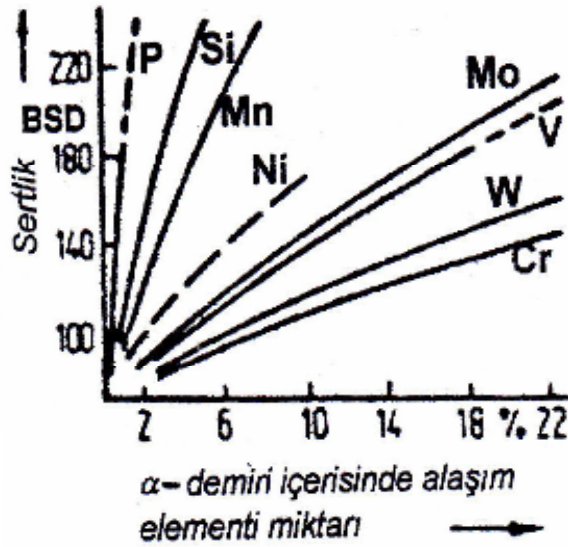
Alaşım elementlerinin mekanik özelliklere etkisi, üç ayrı bakış açısından ele alınabilir:

3.5.1. Katı çözelti durumu

Alaşımless ferritin sertliği, belli başlı alaşım elementlerinin normal miktarlarda (% 1 ila 2) katılması ile fazla bir artma göstermez (Sekil 3. 3.). Öte yandan krom-nikel çeliklerinde korozyona ve östenitik mangan çeliğinde (X120Mn12) darbeli aşınmaya dayanıklılık gibi bazı özelliklere ulaşabilmesi, katı çözelti oluşumuyla ilişkilidir.

3.5.2. İntermetalik bağlantı durumu

Teknikte özel karbürlerden, öncelikle takım çeliklerinde yararlanılır. Uygun ısı işlemler yardımıyla ana kütle (Matriks) içinde ince dağılmış şekilde elde edilen karbürler, çeliğin işletme koşulları altında davranışını iyileştirir.



Şekil 3. 3. Çeşitli alaşım elementlerinin α – demirinin sertliğine etkisi[23].

Karbon miktarı ve ısıtım işlem durumu, karbür oluşumunu etkileyerek, geriye kalan matriks yapının alaşım elementi miktarını belirtir. Düşük karbür miktarı da azalacağından, matriks alaşım elementleri bakımından zenginleşir. Çözme tavlı sonrasında soğutma yavaş yapılırsa, çok miktarda karbür çökeleceği için matriks yapıda alaşım elementlerinin oranı azalır[24,25].

Karışık karbürler ve özel karbürlerin sertliğinin, demir karbürden pek az yüksek olması ve ferrit sertliğinin alaşımlamayla büyük ölçüde değişmesinden dolayı, normal tavlı durumda karbür dağılımı ve miktarı benzer olduğu sürece, alaşımsız ve alaşımlı çeliklerin oda sıcaklığındaki dayanımları yaklaşık aynı düzeyde kalır.

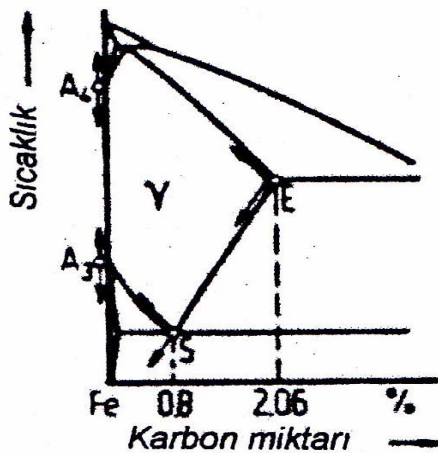
Buna karşın, özel karbürlerin kimyasal ve ısıtım kararlılıklarından dolayı, yüksek sıcaklıklardaki sertlik ile akma sınırı, sürtünme ve aşınma dayanımları alaşımlı çeliklerde belirgin olarak üstündür. Östenitte zor çözünen karbürler, bir yandan aşırı ısınmaya duyarlılığı azaltırken, diğer yandan sertleştirme için östenitleştirme sıcaklığının yükselmesine yol açarlar.

Sert nitürlerden (1200 VSD'ne kadar), teknikte örneğin nitrasyon ile yüzey sertleştirilmesinde yararlanılır. Yüksek dayanımlı ince taneli yapı çeliklerinde karbonitrür çökeltileri, çok ince taneli bir dönüşüm yapısı teşekkül ettirerek, yüksek süneklik yanında, önemli miktarda akma sınırı ve dayanım artışı sağlarlar.

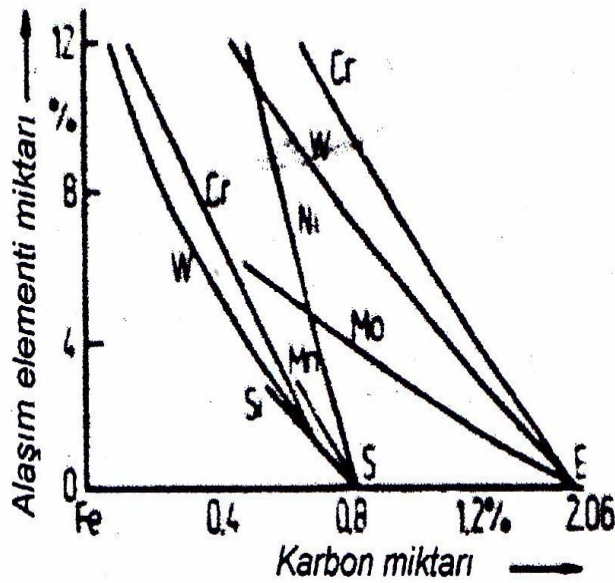
3.5.3. Sertleşme derinliği

Alaşım elementleri karbonun α ve γ - demiri içindeki difüzyon hızını düşürürler. Böylece, ara kademe yapısı (bainit) meydana gelmesi veya kritik soğuma hızının azalmasıyla sertleşme derinliğinin artması, sertleştirilmiş parçaların mekanik özelliklerini iyileştirir. Bu nedenle, mekanik özellikleri ağır bastığı sürece alaşımlı çeliklerin alaşımsızlardan farklı olarak, hemen her zaman sertleştirme ısı işlemi görmeleri, malzemenin ekonomik kullanımı için yararlıdır.

Şekil 3. 1.'de verilen Demir-Karbon denge diyagramı, yapıda yalnızca Fe ve C bulunduğunda ve çok yavaş soğutma koşullarında geçerlidir. Yapıya alaşım elementi girmesiyle birlikte, dönüşüm eğrilerinin sıcaklık ve bileşimleri değişime uğrar. Değişim miktarı, alaşım elementleri cins ve miktarlarına göre farklı olabilirse de, genel değişim karakteristiği Şekil 3. 4.'de verilmiştir.



Şekil 3. 4. Alaşım elementleriyle Demir-Karbon denge diyagramındaki önemli karakteristik noktaların konumlarının kayması[22].



Şekil 3. 5. Demir-karbon denge diyagramında S ve E noktalarının alaşım elementleri etkisiyle değişimi[22].

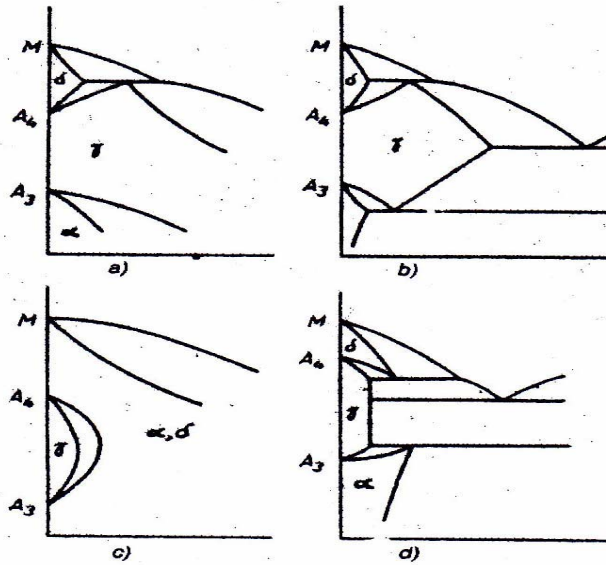
Şekil 3. 5.'de görüldüğü gibi, kobalt dışında tüm elementler, S ve E noktalarını daima sola, yani daha düşük karbon miktarlarına kaydırır. Bunun sonucu olarak;

- Islah çeliklerinde, östenitleştirme sıcaklığı azalır, sertleştirilmiş yapıda yumuşak ferrit tanelerinin bulunma tehlikesi azalmış olur.
- Çelik bölgesinde ($C < \% 2$) oluşabilen ve içerdiği alaşım elementi karbürlerin etkisiyle erime noktası yükselen ledeburit, beyaz dökme demirdekinden farklı olarak dövülebilirlik özelliğini ortadan kaldırmaz. Dolayısıyla, ledeburitik çelikler olarak adlandırılan bu tür malzemeler, üstün aşınma dayanımlarından (karbürler) dolayı, öncelikle takım üretiminde kullanılırlar.

Östenit yapıcılar, A_3 noktasını düşürür, A_4 noktasını yükseltirler. Böylece, östenitin kararlı olduğu alan genişleyerek, belirli bir alaşım oranından sonra da sıcaklığına ulaşır. Bu durumu yaratan östenitik çeliklerin, örneğin korozyona dayanıklılık açısından teknik önlemleri çok fazladır. Anılan malzemelerde dönüşüm söz konusu olmadığından, normal tavlama ve dönüşüm sertleşmesi yapılamaz.

Bu tür alaşım elemanlarının γ - katı çözeltileri içerisinde çözülebilirliği meydana gelen bir fazla sınırlamazsa, bu sistemlere γ sahası açık sistem adı verilir(Şekil 3. 6. a). Genellikle, alaşım elemanlarının γ - katı çözeltileri içerisinde çözülebilirliği sınırlıdır ve yalnızca γ sahasını genişleten sistem mevcuttur. Bu tür sistemlerde sınırlama bir ötektik ile olur (Şekil 3. 6. b). Düşen sıcaklıkla birlikte, alaşım elemanlarının γ - katı çözeltileri içerisinde çözülebilirliğinin azalması, A_3 hattına bağlı olarak bir ötektoid nokta ile sınırlıdır.

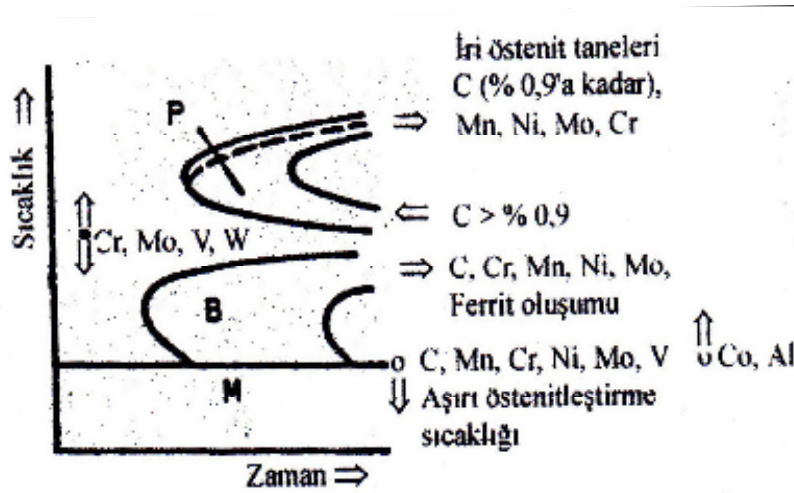
Diğer taraftan ferrit yapıcılar A_3 noktasını yükseltir, A_4 noktasını düşürürler. Bunun anlamı, bu alaşım elemanlarının çözülebilirliği, hacim merkezli kafeste, yüzey merkezli kafese nazaran daha fazladır. Bu tür denge sistemlerine, γ sahasını daraltan sistem denir (Şekil 3. 6. c ve d). Hacim merkezli kafeste çözülebilirlik yeterli derecede büyükse, katı çözelti sistemle sınırlandırılmış kapalı γ sahası teşekkül eder (Şekil 3. 6. c). Sonuçta dönüşüm göstermeyen korozyona dayanıklı ferritik çelikler ortaya çıkar. Bu çeliklerde de normal tavlama ve dönüşüm sertleşmesi yapılamaz. Eğer sınırlama, heterojen bir denge sahasıyla olursa, alaşım elemanının γ - katı çözelti sahasındaki çözülebilirliği belirli bir değerde sona erer(Şekil 3. 6. d.).



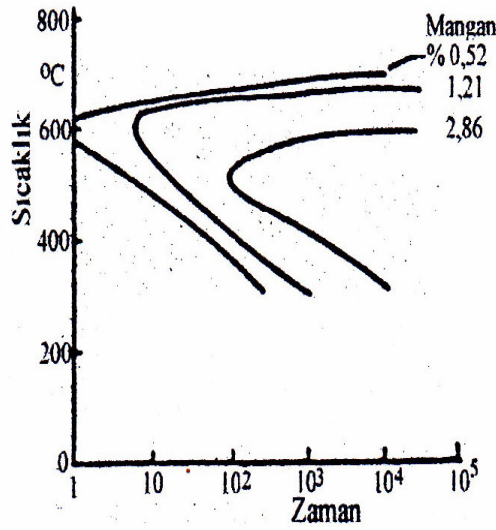
Şekil 3. 6. γ - katı çözeltilerinin bulunduğu sahanın alaşım elemanlarıyla değişmesi
a) ve b) γ sahasının genişlemesi,
c) ve d) γ sahasının daralması[22].

Karbonun γ ve α - katı çözeltilerindeki difüzyon hızı, alaşım elementlerinin artması ile önemli ölçüde azalır. Bu nedenle, faz dönüşümleri alaşımsız çeliklere nazaran daha yavaş gelişir.

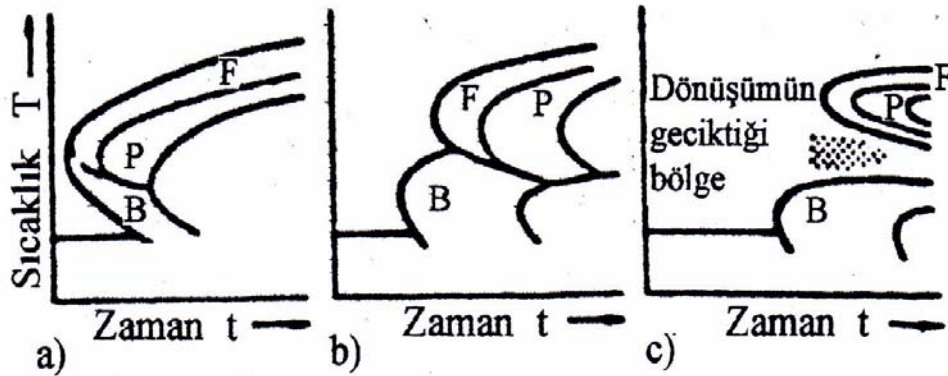
Alaşım elementlerinin östenitin soğutulmasındaki dönüşüm etkisi, Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (ZSD) diyagramlarında kolayca görülebilir. Şekil 3. 7.'de görüldüğü gibi alaşım elementleri, perlit ve bainit kademelerindeki dönüşmeleri genellikle daha uzun sürelerle kaydırırlar, yani kararsız östenitin dönüşüm eğilimini azaltırlar. Bu durum alaşımlı çeliklerde kritik soğuma hızının düşmesiyle, daha düşük soğutma hızlarında da martenzit teşekkül etmesini sağlar. Şekil 3. 8.'de artan mangan miktarının, perlit teşekkülünü geciktirmesi görülmektedir.



Şekil 3. 7. Alaşım elementlerinin ve diğer etkenlerin, ZSD diyagramında dönüşüm kademelerini kaydırması[22].



Şekil 3. 8. % 0,9 C'lu alaşımsız çelikte, perlit kademesinde dönüşümün başlangıç eğrisinin, Mn miktarı ile değişimi[22].



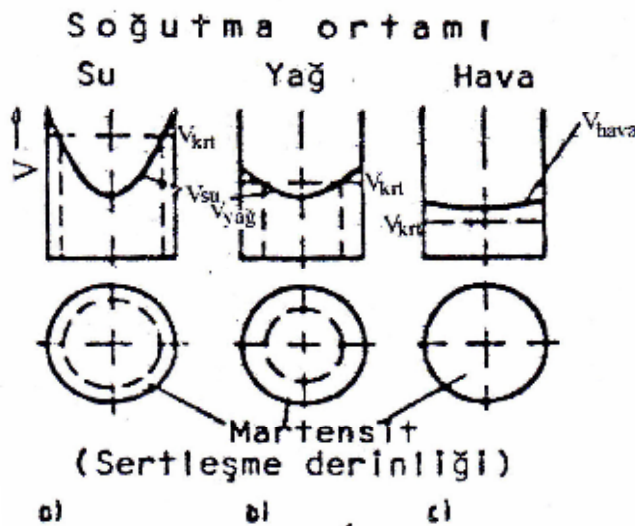
Şekil 3. 9. Alaşım elementlerinin etkisiyle, perlit ve beynit kademelerinin belirgin olarak birbirinden ayrılması[22]

Alaşımsız çeliklerde dönüşümün en hızlı başladığı “burun” bölgesindeki perlit ve beynit alanları, yaklaşık aynı soğuma eğrisi üzerinde ve birbirini izler biçimde bulunurlar. Böylece, beynitin sürekli soğuma ile elde edilmesi güçleşir(Şekil 3.9. a). Karışık ve özel karbürlerin segragasyonu için karbonun yanında difüzyon yapması gereken alaşım elementleri, öncelikle perlit oluşumunu daha yüksek sıcaklıklara ve uzun sürelerle kaydırılır. Şekil 3. 9. b’de görüldüğü gibi, beynit burnu ayrılarak öne çıkar. Karbür yapıcı elementlerin daha fazla miktarlarda bulunması halinde ise perlit

ve beynit kademeleri arasında dönüşümün olmadığı bir sıcaklık aralığı ortaya çıkar(Şekil 3. 9. c).

Alaşım elamanlarının perlit ve beynit dönüşüm başlangıcını geciktirmesi, daha düşük soğuma hızlarında da martenzit oluşumuna imkan sağlar, yani çelikte üst soğuma kritik soğuma hızı azalır. Bundan dolayı, daha düşük soğutma gücü olan ortamlarda ani soğutmada da martensitik yapı ve daha fazla sertleşme derinliği elde edilebilir (Şekil 3. 10.). Söz konusu özellikler, pratik açıdan aşağıdaki sonuçları doğurur:

- Kalın kesitli parçaların tüm kesiti sertleştirilebilir. Ayrıca, soğutma hızı daha düşük olduğundan, iç gerilmelerle birlikte çarpılma ve çatlama tehlikesi de azalır.
- İnce kesitli, fakat karmaşık biçimli (komplike) parçaların da sertleştirme işleminden dolayı, çarpılma, çatlama gibi deformasyonları çok azalır (alaşimsız çelik kullanılması halinde suda ani soğutma deformasyonları artırır, yağda ani soğutmada ise soğutma hızı, sertleşme için yeterli olmaz).



Şekil 3. 10. Uygun ortamlarda ani soğutma yapılmış, alaşimsız, düşük alaşımlı ve yüksek alaşımlı çeliklerde, şematik olarak sertleşme derinliklerinin karşılaştırılması. a) Alaşimsız çelik suda ani soğutulmuş, b) Düşük alaşımlı çelik yağda ani soğutulmuş, c) Yüksek alaşımlı çelik havada soğutulmuş[22].

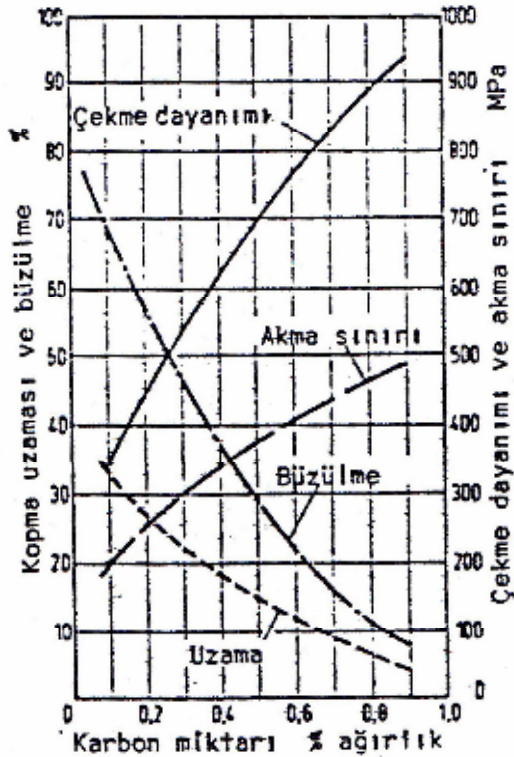
Diğer taraftan, artan alaşım elementi cins ve miktarı ile martensit dönüşümün başladığı M_s sıcaklıklarının düşmesi, alaşımlı çeliklerde tam martensitik yapıya ulaşılmasını zorlaştırır. Özellikle yüksek karbonlu ve alaşımlı çeliklerde, ani soğutma işlemi oda sıcaklığına kadar yapıldığında, yapıda önemli miktarda artık östenit kalabilir ve bu östenitin de martensite dönüştürülmesi arzu edilirse, derin soğutma (M_f sıcaklığına ya da daha da altına kadar soğutma) yapılması gerekebilir. Ancak, artık östenitin yüksek sıcaklıkta menevişlenmesi ile yeni karbürler oluşturmak suretiyle, ikincil sertleşme etkisi yaratabilir[22,23,24,].

Yukarıda verilen bilgilerin bir özeti olarak, çelikte demir dışında bulunan arıtılamayan elementler ve önemli alaşım elementlerinin her birinin çeliğin özelliklerine etkileri şöyledir:

3.6. Alaşım Elementleri ve Etkileri

3.6.1. Karbon (C)

Çeliğin en temel alaşım elementidir. Şekil 3. 11.'de görüldüğü gibi, karbon miktarının artmasıyla birlikte alaşımsız çeliklerin dayanımını ve sertliğini önemli ölçüde arttırır. Karbon miktarı arttıkça çelikteki perlit oranı arttığından, çeliğin çekme dayanımı ve akma sınırı artar, yüzde uzamayı, şekillenebilirliği ve kaynak kabiliyetini azaltır. Ancak, % 0,8 ila 0,85 C değerinden sonra dayanım daha fazla artmamasına karşılık, çelik giderek kırılganlaşır. Sertleştirilmiş çeliklerde en yüksek sertlik değerine (yaklaşık 67 RSD-C) yaklaşık % 0,6 C düzeyinde ulaşır ve karbon miktarının daha da arttırılmasıyla, ani soğutma sonrasında yapıda artık östenit kalacağından sertlikte artma meydana gelmez. Diğer taraftan, karbon miktarı artıkça çeliğin sünekliliği, dövülebilirliği, derin çekilebilirliği ve kaynak edilebilirliği azalır, ısıtılarda çatılma ve deformasyon eğilimi artar. İşlenebilirliğin ön planda olduğu çeliklerde karbon miktarı düşük tutulmalı, dayanım değerlerinin yüksek olması gerektiği durumlarda ise çeliğin karbon içeriği yüksek olmalıdır.



Şekil 3. 11. Alaşımsız çeliklerin haddelenmiş halde mekanik özellikleri[22,23].

3.6.2. Mangan (Mn)

Çeliğe genelde cevherden intikal eder, fakat özellikleri iyileştirdiğinden belirli bir oranda çeliğin içerisinde bulunması istenir, hatta alaşım elementi olarak artırılabilir. Manganın en önemli özelliği kükürtle MnS bileşiği yapması ve demir kükürt (FeS) bileşiği oluşumunu engellemesidir. FeS sıcak kırılmalığa neden olur. Çeliğin dayanımını artırır, fakat sünekliğini biraz azaltır. Manganın, çekme dayanımı ile akma sınırı artışı etkileri birbirine benzer. % 3 Mn miktarına kadar, her % 1 Mn artışı ile çekme dayanımı yaklaşık 100 MPa artar. % 3 - 8 Mn miktarları arasında artış daha azdır ve % 8 Mn miktarlarından itibaren düşme görülür. Çeliğin dövülebilirliğini ve sertleşebilirliğini iyileştirir. Kaynak kabiliyetini olumsuz olarak etkilemez, bu nedenle düşük karbonlu, fakat nispeten yüksek dayanımlı kaynak edilebilir çeliklerde % 1,6'ya kadar Mn ilave edilir. Yüksek mangan (% 12 - 13 Mn) ve yüksek karbonlu çelikler östenitik yapıya sahiptirler ve aşınma dayanımları yüksektir. Mangan ayrıca çeliğin yüzey kalitesini iyileştirir.

3.6.3. Silisyum (Si)

Çelik üretiminde oksijen giderici olarak kullanılan temel elementlerden biridir. Çelikte bulunan silisyumun miktarı, üretim tarzına bağlı olarak da değişir. Sakin dökülen alaşımsız çeliklerde, en fazla % 0,60 Si bulunabilir. Çeliğin akma, çekme dayanımını ve elastikiyetini artırır. Yaygın olarak yüksek elastikiyet gerektiren yay çeliklerinde kullanılır. Düşük alaşımlı çelikler ve yay çelikleri, % 2'ye kadar Si içerirler. Buna karşın, silisyumlu çelikler diye adlandırılan, elektroteknikte kullanılan çeliklerde Si miktarı % 5'e kadar yükselebilir. Ayrıca, % 14 - 15 Si içeren çeliklerde de korozyon dayanımı iyidir, fakat dövülemezler ve kırılğandırılar. Silisyum miktarı arttıkça, çeliğin tane büyüklüğü de artar.

Silisyum, çeliğin dayanımını ve sertliğini arttırır, fakat etkisi mangandan azdır. Çeliğin sertleşebilirliği, aşınmaya karşı dayanımı ve elastikiyeti yükselir, yüzey kalitesini olumsuz etkiler.

3.6.4. Kükürt (S)

Otomat çeliklerinde kükürt miktarı, talaşlı şekillendirmeyi iyileştirmek için kullanılır. Bunun dışında istenmeyen bir elementtir ve daima azaltılmaya çalışılır. Yeni gelişen teknolojilerle, bugün % 0,003 S değerine kadar inilebilmektedir. Çelik kalitelerinin belirtilmesinde sınırlanan element olarak fosforla birlikte birinci planda göz önünde tutulur.

Kükürt miktarı yükseldikçe, şekillendirmeye dik doğrultuda süneklilik ve darbe dayanımı düşer, boyuna doğrultuda etkilenme azdır. Kükürt demirle birleşerek FeS fazını oluşturur. Bu faz düşük ergime sıcaklığına sahip olduğu için haddeleme sıcaklığında ergiyerek sıcak kırılğanlığa neden olur. Bu olumsuz etki kükürdün manganla birleşmesi sağlanarak önlenir. Sadece talaşlı şekillendirmeye uygun otamat çeliklerinde kükürt miktarı yüksek tutulur. Kaynak edilebilirliği ve sertleşebilirliği kötüleştirir.

3.6.5. Fosfor (P)

Fosfor çelik içinde üretim işlemlerinden kalan bir elementtir. Ferritin dayanımını en fazla arttıran elementtir. Bu nedenle, düşük miktarlarda bulunsun bile çeliğin dayanımını ve sertliğini artırıcı, buna karşın şekillendirme yönünde sünekliliği ve darbe dayanımını azaltıcı etki yapar, soğuk kırılabilirliğe neden olur. Bu etkiler, özellikle yüksek karbonlu menevişlenmiş çeliklere daha fazladır. Ayrıca, çeliğin korozyon dayanımını iyileştirmesine karşın, kükürtle birlikte çelikte mümkün olduğunca az bulunmasına çalışılır ve kalite belirlenmesinde birinci planda rol oynar.

3.6.6. Molibden (Mo)

Tane büyümesini önler. Kuvvetli karbür ve nitrid yapıcı elementtir ve düşük alaşımlı çeliklerde genellikle krom (nikel) ile birlikte % 0,15 - 0,30 arasında bulunduğunda çeliğin sertleşebilirliğini, çekme dayanımını ve sıcaklık dayanımını artırır, meneviş kırılabilirliğini azaltır. Alaşımlı takım çeliklerinde önemli bir alaşım elementidir ve yüksek miktarlarda katılır, sıcaklık ve aşınmaya karşı dayanımını iyileştirir. Paslanmaz çeliklerde korozyon direncini artırır.

3.6.7. Vanadyum (V)

Benzer alaşım elementleri gibi, tane küçültme etkisi yaparak çeliklerin akma ve çekme dayanımlarını oldukça artırır. Ayrıca sertleşebilme kabiliyetini artırır, menevişleme ve ikinci sertleşmede olumlu etkileri vardır. Azot ile birleşip nitrid teşekkül ettirerek, ferritik yapıda tane küçülmesi sağlar. Bu nedenle, çentik dayanımını da yükseltir. Kuvvetli karbür teşekkül ettirici olduğundan, aşınmaya ve sıcaklık dayanımını arttırmak için takım çeliklerinde volframla, sıcaklık dayanıklı çeliklerde krom ile birlikte katılır.

3.6.8. Niobyum (Nb)

Özellikle yüksek alaşımlı düşük dayanımlı (YDDA) çeliklerde kontrollü haddeleme ve soğutmayla özellikleri iyileştirmek için ve ısıcağa dayanıklı çeliklerde kullanılır. Çeliklerde tane küçültme etkisi en yüksek olan mikroalaşım elementidir. Kuvvetli karbür ve nitrür yapıcıdır. Sertliği, akma sınırını yükseltir ve şekil değişebilirliği azaltır. Paslanmaz çeliklerde titanyumla birlikte veya tek başına kullanılır.

3.6.9. Titanyum (Ti)

V, Mo, W ve Nb gibi kuvvetli karbür ve nitrür yapıcıdır. Östenitik çeliklerde yapılarda denge sağlar, genel olarak çeliklerde taneleri inceltir. Ayrıca, Al ile birlikte dezoksidan madde (oksit giderici) olarak da sakin dökülen çeliklerde kullanılır.

3.6.10. Alüminyum (Al)

En güçlü oksijen gidericidir. Azot ile kuvvetli nitrür teşekkül ettirir, ısıtmada tane kabalaşması ve çeliğin yaşlanma eğilimin azaltır. Çelik üretiminde, taneleri inceltir. Akma dayanımını ve darbe tokluğunu artırıcı etki gösterir.

3.6.11. Azot (N)

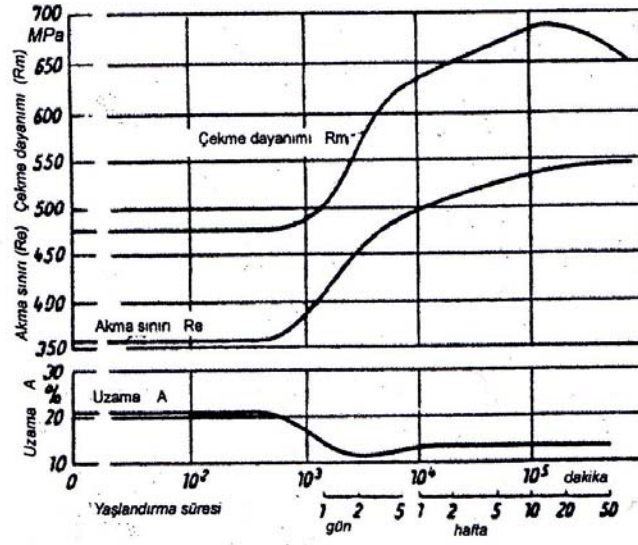
Nitrür teşekkül ettirdiği için önemlidir. Çelikte yaşlanma meydana getirir. Yaşlanmanın sorun olmadığı durumlarda, sertliği, mekanik dayanımı ve atmosfer korozyonuna dayanımı artırır. Uygun alaşımlı çeliklerin yüzeyine nüfuz ettirilerek, yaklaşık 1100 VSD değerine kadar yüzey serliğine ulaşılmasını sağlar. Aynı zamanda, kırılganlığa neden olur ve eğme özelliklerini kötüleştirir[22].

3.7. Çeliklerde (Empüritelerin) Metalik Olmayan Elemanların Etkisi

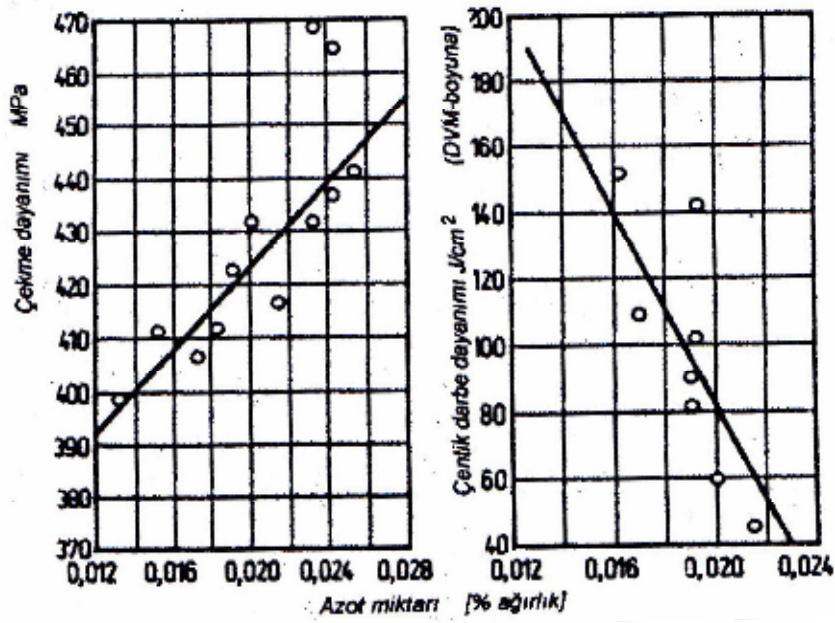
Hammaddeden erğiyeğe intikal eden ya da üretim tarzına bağlı olarak üretim esnasında karışan arıtılamayan elemanlar, çeliğin özelliklerini çok yönlü etkilerler.

Çeliğin kalitesinin belirtilmesinde karakteristik olarak özellikle azot, fosfor ve kükürt önemlidir. Üretim yöntemlerine bağlı olarak, bu elemanların miktarına etki edilebilir.

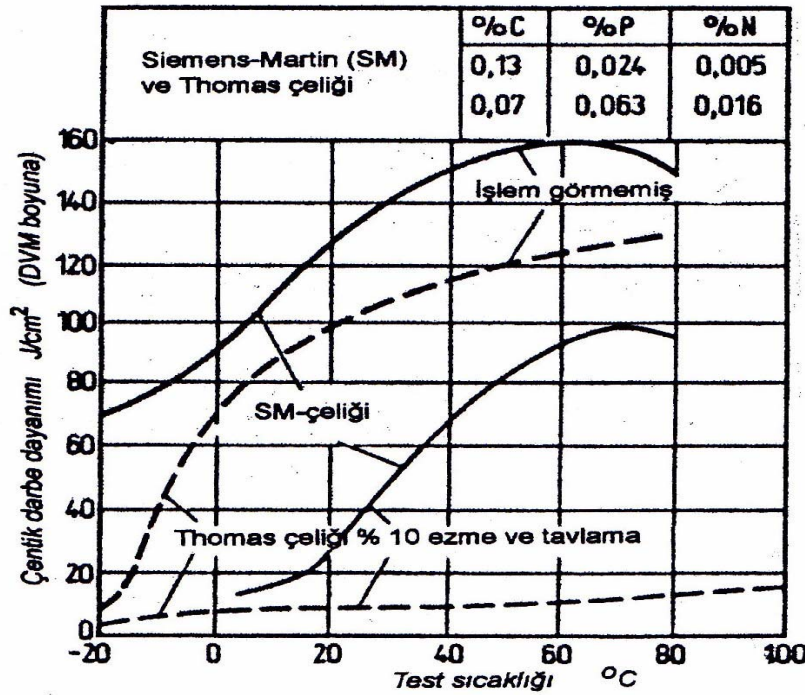
α – demirinde 590 °C sıcaklıkta (Fe – N sisteminde ötektoid sıcaklığı) yaklaşık % 0,1 azot çözebilir. Buna karşın, oda sıcaklığında çözülebilirlik yalnızca yüzde birden (< % 0,1) daha azdır. Çeliğin, örneğin haddeleme, tavlama ya da kaynaktan sonra soğumasında, azot miktarı tüm teknik çeliklerde oda sıcaklığında çözülebileceğinden fazla kalacağından, aşırı doymuş bir çözelti meydana gelir. Azot uzun süreli yaşlandırmadan sonra, metastabil formda demirnitür olarak çöker. Bu olay ‘‘yaşlandırma’’ olarak adlandırılır. Sıcaklığın yükselmesi ya da soğuk şekillendirme, bu olayı hızlandırır. Yaşlanma, düşük karbonlu çeliklerde yaklaşık % 0,01 azot miktarlarında, dayanımın ve sertliğin artması şeklinde hissedilebilir. Ancak, bu esnada şekillenebilirlik ve süneklik önemli ölçüde düşer ve malzeme kırılgan hale gelir(Şekil 3. 12.). Çentik darbe dayanımının ve kırılganlığa meylin geçiş sıcaklığı (Darbe Geçiş Sıcaklığı) bu olaydan dolayı yükselir. Özellikle kaynak bağlantılarında, ısı etkisinin de olması, daha sonraki darbeleri zorlamalarda tehlikeli kırılmalara neden olur. Yaşlanma olayı, fosforla şiddetlenir ve pek az karbon ve oksijen miktarlı yumuşak çeliklere deformasyon görülür. Yaşlanmaya karşı dayanım değeri, en iyi şekilde çentik darbe dayanımının ölçülmesiyle bulunabilir. Örnekler, 250 °C sıcaklıkta 1/2 ila 1 saat süreli menevişle yapay yaşlandırma deneyi yapılır ve normal tavllanmış örneklerle karşılaştırılır. Şekil 3. 13.’de, alaşımsız çeliklerde azot miktarlarına bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi verilmiştir. Ayrıca, Şekil 3. 14’de de, Siemens–Martin ve Thomas çeliklerinde, çentik darbe dayanımının fosfor ve azot miktarlarından etkilenmesi, test sıcaklığına bağlı olarak tekrar verilmiştir.



Şekil 3. 12. % 0,035 C ve % 0,015 N içeren çelikte yaşlanma süresine bağlı olarak özellik değişimleri[22].



Şekil 3. 13. Azot miktarına bağlı olarak çekme ve çentik darbe dayanımı[22].



Şekil 3. 14. Kaynar dökülmüş Thomas ve Siemens–Martin çeliklerinde çentik darbe dayanımı değerinin azot ve fosfor miktarına göre değişimi[22].

Alışılmış miktarlardaki fosfor, çelikte α – demiri içerisinde çözülebilir. Yumuşak çeliklerde sertliğin ve dayanımın önemli ölçüde artmasına, fakat sünekliğinin çok fazla azalmasına neden olur. Yükselen fosfor miktarı, soğuk kırılmalık meydana getirir ve bükülebilirliği çok azaltır. Bu tür saclar, gemi inşası için uygun değildir. Fosfor, çelik kütüklerde çok fazla homojensizlik gösteren özelliğe sahip bir elementtir. Özellikle kütüklerin üst kısımlarının ortasında meydana gelen fosfor zenginleşmesi (blok segregasyonları) haddeleme ile bertaraf edilemez ve fosfor demirin ergime sıcaklığını düşürdüğünden, kaynak esnasında hatalar meydana gelir.

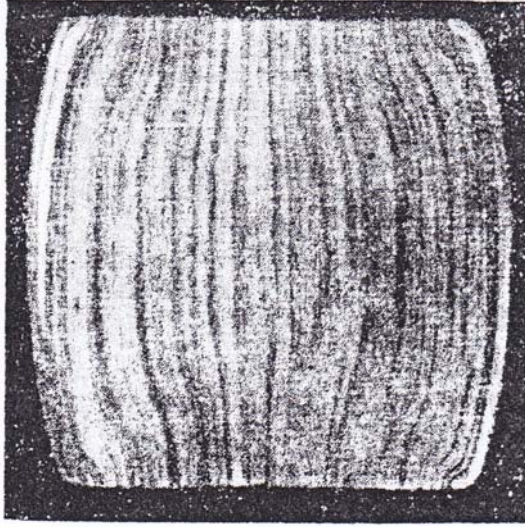
Fosfor, blok segregasyonlarından başka, kristal segregasyonları da meydana getirir. Dendritler arasındaki hacimde zenginleşir ve karbonun $\gamma \rightarrow \alpha$ dönüşümünü kısıtlar. Haddeleme ya da dövme sırasında, dendritik ve interdendritik hacim şekillendirme doğrultusunda yönelir ve homojen olmayan fosfor ve karbon dağılımı ortaya çıkar(Şekil 3. 15.). Bu şekilde, düşük ve orta karbonlu çeliklerde, özellikle sementasyon çeliklerinde arzu edilmeyen perlit dizisel yapısı teşekkül eder. Dizisel

yapının, normal tavlama ile etkisi azaltılabilecek hale getirilebilir, ancak tamamen yok edilmesi yalnızca difüzyon tavlaması ile mümkündür.

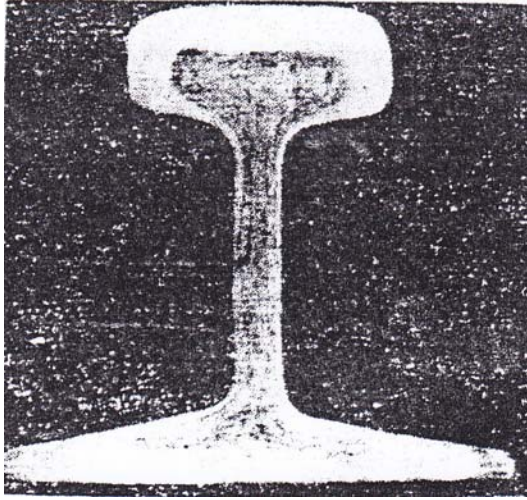
Kükürt, kuvvetli blok segregasyonlarına eğilimi olan elementlerden sayılır(Şekil 3. 16.). Fosforun aksine, kükürt çelik içerisine çözülmez ve düşük ergime sıcaklıklı demirsülfür teşekkül ettirir. Demirsülfür, sıcak şekillendirmeyi zorlaştırıyor ve sıcakta kırılganlık meydana getirir. Bundan dolayı, mangan ilavesiyle yüksek ergime sıcaklıklı mangansülfür teşekkül ettirilir. Keza, bu yapı da şekillendirmede dizisel formda kalır ve özellikle haddelemeye dik doğrultuda sünekliği çok azaltır. Fosfor ve kükürt, çeliğin işlenme ve kullanma özelliklerine çok fazla etki yaptığından, bu elementlerin miktarına bağlı olarak genel yapı çeliklerinin kaliteleri şöyle gruplanır:

- Kütle Çelikleri % 0,040 - 0,060 P ve % 0,40 - 0,050 S
- Kaliteli Çelikler max. % 0,045 P ve max. % 0,045 S
- Asal (Soy) Çelikler max. % 0,035 P ve max. % 0,035 S

Takım çeliklerinde ve yeni geliştirilen çelik türlerinde (örneğin, mikro alaşımlı çelikler), fosfor ve kükürt miktarları çok daha düşük seviyelere indirilir. Ayrıca, genel konstrüksiyon çeliklerinde de, yukarıda belirtilen sınırlardan sapma değerleri de olabilir. Azot miktarı, kütle halinde üretilen genel yapı çeliklerinde önemlidir, ancak bu tür çeliklerin üretiminde de oksijen konvertörlerinin daha yaygın kullanılmaya başlanması, diğer yararları yanında azot sorununun çözümüne de katkı sağlamaktadır. Diğer tüm konstrüksiyon ve takım çelikleri, daha çok asal çelik ya da en azından kaliteli çelik olarak üretildiklerinden, azot miktarı zararlı olma miktarının çok altında tutulur. Alaşım elementi olarak azota, ince taneli çelikler ya da östenitik çelikler gibi bazı çeliklerde, mikro alaşım elementi olarak rastlanır.



Şekil 3. 15. Haddelenmiş çelikte fosfor segregasyonu (örnek ezilmiş) [22,23].



Şekil 3. 16. Bir ray malzemesinde kükürt segregasyonu[23]

3.7. Üretim Yöntemlerinin Etkisi

Sanayinin gelişmesiyle birlikte, çelik üretiminde daha çok, Bessemer ve Thomas konvertörleri, Siemens–Martin yöntemi, oksijen konvertörleri ve elektro ark ergitme yöntemleri kullanılmıştır. Bugün ise, özellikle alaşımsız ve düşük alaşımlı çelik üretiminde, bazik oksijen konvertörleri önem kazanmıştır ve 1990’lı yıllarda dünya çelik üretiminin yaklaşık % 65 ila 70 kadarı bu yöntemle üretilmektedir. Elektro ark

yöntemi de son yıllarda çok geliştirilmiş ve oldukça büyük kullanım oranına sahiptir. Hatta ülkemizde, çelik üretiminin % 50'den fazlasında halen bu yöntem kullanılmaktadır.

Siemens–Martin yönteminde, daha çok hurda takviyeli çalışılır ve çelik üretimi için gerekli metalürjik olaylar, önemli ölçüde çelik banyosu yüzeyinin cüruf örtüsüyle ya da sıcak gazlarla reaksiyonu ile olur. Cüruf reaksiyonu ile arzu edilmeyen arıtılamayan elementlerden fosfor ve kükürt, önemli ölçüde azaltılabilir.

Cüruf örtüsü nedeniyle atmosferle temas önlediğinden, Siemens–Martin çelikleri oldukça düşük miktarlarda azot ihtiva ederler. Bazı oksijen konvertörü ve elektro ark yöntemindeki gelişmelerden dolayı, bu yöntemin kullanım oranı çok düşük seviyelere inmiştir.

Zamanla terk edilen yöntemler arasında hava tazelemeli çelik üretimi, Bessemer yöntemi (asit astarlı konvertör) ve Thomas yöntemi sayılabilir. Bessemer ve Thomas yöntemlerinde, % 3 ila 4,5 karbon ve diğer elementleri (Si, Mn, P ve S) içeren ham demir ergiyiği konvertöre konur.

Arzu edilmeyen elamanları uzaklaştırmak için, ergiyik ham demir içerisine hava üflenir. Bu esnada, yabancı elementler deoksida olarak cürufa çıkarken, ergiyiğin sıcaklığı da hızla yükselir. Üretim sisteminin bir sonucu olarak, düşük karbon miktarlarında (% 0,02 ila 0,03 C) Bessemer çelikleri nispeten yüksek silisyum miktarlı, Thomas çelikleri ise nispeten yüksek fosfor miktarları (% 0,06 ila 0,08) üretirler.

Hava üflemesi esnasında, ergiyik demirde yaklaşık % 0,015 ila 0,020 kadar azot alır. Azot miktarının teknik için uygun değerlere redüklenmesi amacıyla, banyo sıcaklığı düşülerek N_2 'nin kısmi basıncının azalmasıyla, hava oksijenle zenginleşir ve alüminyum ilave edilerek kimyasal bağlantı meydana getirilir. Bu şekilde iyileştirilmiş konvertör çelikleri, yaklaşık olarak Siemens – Martin çelikleriyle eşdeğerdir.

Eğer ergiyik pike yalnızca oksijen üflenirse (oksijen konvertör yöntemi), başta azot olmak üzere diğer arıtilamayan elemanlar da Siemens – Martin çeliklerine nazaran daha düşük değerlere indirilebilir. Bu yöntem Avustralya'nın Linz ve Donawitz (LD) kentlerindeki çelik fabrikaları tarafından geliştirip, ilk kez 1949 yılında endüstriyel ölçekte kullanılmıştır. Bu nedenle LD – çeliği ya da bazik konvertörlerde gerçekleştirildiği için Bazik Oksijen Fırını (BOF) çeliği olarak da adlandırılır. Elde edilecek çelikte azot miktarının çok az olmasını sağlayan teknik saf oksijen, su ile soğutulan borudan (Lens), konvertördeki sıvı pik banyosunun üzerine üflenir. Oksijen üfleme sonucu, sıvı pik içindeki C, Si, Mn, P gibi elementler oksitlenerek istenilen düzeye düşürülür. Bu oksitlenmeler sonucunda, sıvının sıcaklığı yükseldiğinden, % 25 – 30 oranında hurdanın da konvertöre ilave edilmesi mümkündür. Hatta yeni geliştirilen LD yöntemlerinde, konvertöre oksijenle birlikte yakıt da verilmek suretiyle, % 100 katı hurda ile çalışma sağlanabilmektedir.

Konvertörlerde, Thomas yöntemine nazaran daha yüksek sıcaklıklara dayanıklı bazik refrakter kullanımı gerektirmesine karşı, 90 ila 300 ton pikin yaklaşık 30 dakikada sıvı çeliğe dönüştürülebilmesi, yöntemin pik çeşidine pek az bağımlılığı ve asal çeliklerin de ekonomik olarak üretilmesinden dolayı, çok hızlı bir gelişme sağlamıştır. 1990 yılında dünya çelik üretiminin % 57 kadarı, bu yöntemle üretilmiştir. 1950 yılında % 84,2 olan Siemens – Martin fırınları kullanım oranı da bazik oksijen konvertörleri ve elektrik ark fırınlarının gelişmesinin sonucu olarak 1990 yılında % 16,6'ya düşmüştür. 1990 yılında ülkemizde bazik oksijen konvertörü ile çelik üretim oranı % 40 kadardır.

Çeliğin elektrotlu ark fırınlarındaki (Elektro Ark Fırın çeliği – EAF yöntemi) üretiminde, hammadde olarak daha çok % 100 hurda kullanılır. Elektrik arkı ile çok yüksek sıcaklıklara (2000 °C) ulaşabildiğinden, teşekkül eden cüruf daha fazla reaksiyon kabiliyetli olur. Böylece, fosfor ve kükürdün azaltılması daha iyi yapılabilir. Bundan başka, yüksek sıcaklık, ergiyik banyosunda çok zor eriyebilen bağlantıları da çözdüğünden, özellikle yüksek alaşımlı çelikler bu yöntemle üretilirler. Kuşkusuz, yüksek banyo sıcaklığı azotun çözülmesini de artıracığından, elektro çeliklerde azot miktarı Siemens–Martin yöntemine nazaran daha yüksek

olabilir. Fırın sıcaklığının yüksekliği, oksijen aktivitesinin azlığı gibi üstünlüklerin yanında, çift cüruf yönteminin uygulanabilmesi, bu yöntemde üstün nitelikli çelik üretimini mümkün kılar.

Elektro ark çeliği üretimi de, bazik oksijen konvertörlerinde olduğu gibi gelişim içerisinde. Fırınlarda elektrik enerjisi yanında oksijen ve ilave yakıt (doğal gaz) kullanılması, fırın iç cidarlarına soğutma panelleri yerleştirilmesi, rafinasyonu tamamlamış sıvı çeliğin fırın tabanından alınması ve doğru akım kaynağı kullanılması gibi, üretim kalitesini yükseltecek ve ekonomik üretimi mümkün kılacak uygulamalar yapılmaktadır. Dünya çelik üretiminde elektro ark fırınlarının kullanma oranı 1950 yılında % 5,3 iken, bu oran 1990 yılında % 27,5 değerlerine ulaşmıştır. Ülkemizde ise, 1997 yılında toplam 11.622.842 ton olan ham çelik üretiminin 7.237.089 ton kadarı, yani yaklaşık % 62,3 kadarı elektro ark fırınlarında üretilmektedir.

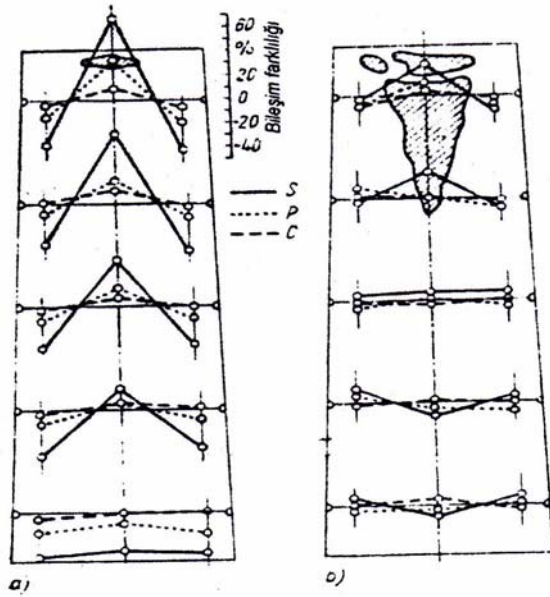
Daha çok küçük kapasiteli işletmelerde kullanılan indüksiyon ertitme yöntemiyle üretilen çeliğin özellikleri, büyük ölçüde elektro ark yöntemine benzer. Hammadde olarak daha çok hurda kullanılır, kaliteli, asal çelik ve alaşımlı çelik üretiminde kullanılabilir.

Ergiyik çeliğin vakum işlemiyle ya da özel yöntemlerle çok sayıda ertitme ile özel istekleri karşılayacak aralıktaki çelik üretimi olanaklıdır. Bu yöntemlerden elektro cüruf yöntemi, elektron radyasyonlu çok kamaralı ertitme ve plazma ertitme sayılabilir (süper arı çelikler). Özel isteklerin dışında genel olarak, ark ve indüksiyon çelik ertitme fırınları kullanılır. Vakum içerisinde ertitme yapılmakla, oksit, nitrür, sülfür ve azottan başka, oksijen, çinko ve kurşun gibi diğer zararlı arıtılamayan elemanlar (empüriteler) da azaltır[24].

3.9. Döküm Tarzının Etkisi

Ergiyik haldeki çeliğin, ergiyikten katı hale geçişe kadar, sıcaklığı da bağımlı olarak bir zaman geçmesinden dolayı, ergitme fırınındaki olayların dışında, özellikle gazların etkili olduğu, çözülebilirlikle ilgili yeni olaylar meydana gelir.

Rafinasyon esnasında, ergiğin oksijen alması ve demirinde kısmen oksidasyonu kaçınılmazdır. Dökümden sonraki soğuma esnasında serbest kalan oksijen, çeliğin karbonu ile reaksiyona girer ve ergiyikte pek az çözölebilen karbon monoksit, gaz kabarcıkları formunda banyo yüzeyinde kaynama meydana getirerek dışarı çıkar. Bundan dolayı, dökümün bu tarzına kaynar dökülmüş döküm ya da kaynar döküm veya kaynar çelik adı verilir.



Şekil. 3. 17. Çelik kütüklerde blok segregasyonu[22]
a) Kaynar döküm b) Sakin döküm

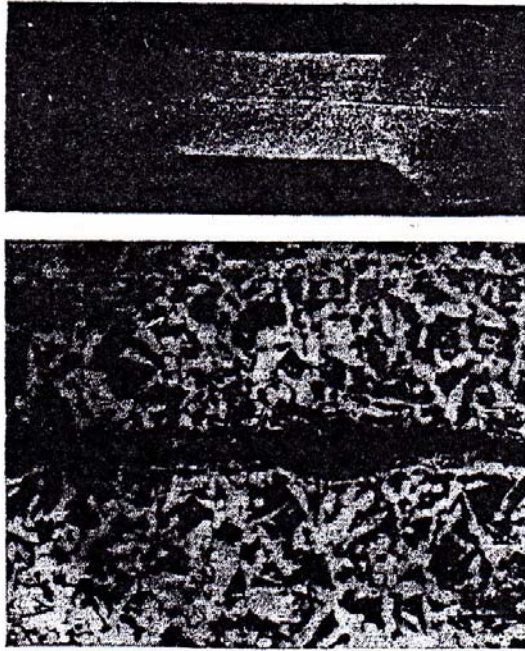
Soğuk döküm ingotlarıyla yoğun ısı çekme ile cidar bölgelerinde çok hızlı bir soğuma ve ince yapıli tane elde edilir. Yüksek katılaşma sıcaklığının etkisiyle de, bu bölge daha az karbon ve arıtilamayan element içerir. Kokil, kütük içerisinde gelen ısıyla ısındıktan sonra, katılaşma cephesinin hızı düşer. Teşekköl eden ve daha sonra yukarıya doğru yükselen gaz kabarcıkları, kütüğün ortasında ve üst kısmında,

arıtılamayan elemanlarca zengin bölgeler (blok segregasyonları) meydana getirir. Bu esnada, kütüğün dip tarafında, bileşim dağılımı, (Şekil 3.17.a) yaklaşık olarak aynıdır. Normal şartlarda, en belirgin farklılık kükürtte, daha sonra fosforda, müteakiben de karbon ve oksijenle meydana gelir.

Eğer ergiğiye pota içerisinde, döküm esnasında ya da kokil içerisinde, karbona nazaran oksijene ilgisi daha fazla elementler katılırsa, gaz formundaki oksidasyon ürünlerinin teşekkülüne mani olunabilir ve çeliğin ergime sıcaklığında da katı olan oksitler teşekkül eder. Deoksidasyon adı verilen bu işlem için, daha çok alüminyum ve silisyum kullanılır. Alüminyum aynı zamanda, azotla da (denitrasyon) birleşir. Katı reaksiyon ürünleri, kısmen ergiğin yüzeyine doğru yükselir, kısmen de metalik olmayan empüriteler olarak, istenmemesine karşın yapıda kalır. Bu bağlantılar, şekillendirmeden sonra dizisel yapı olarak kalır ve şekillendirmeye dik doğrultuda özellikleri kötüleştirir.

Ayrıca, eğer yüzeyde bulunurlarsa, talaşlı şekillendirmeden sonra yorulma çatlakları için başlangıç noktası olarak rol oynar. Rulmanlı yatak bilezikleri benzeri darbeli zorlanan parçalarda ömrü azaltırlar. Buna karşın, alüminyum nitrür çeliği ince taneli yapar. Bundan dolayı, yüksek değerli yapı çelikleri, alüminyumla deokside edilmiş ve azotu alınmış durumdadır. Deoksidasyon işlemi nedeniyle çeliğin üst yüzeyi hareketsiz kaldığından, bu tür çeliklere durgun dökülmüş çelikler ya da sakin dökülmüş çelikler denir.

Döküm sıcaklığından katılaşma sıcaklığına kadar soğumada ve ergiyik – katı geçişinde, bir hacim azalması meydana gelir. Sakin dökülmüş çeliklerde, malzemenin üst yüzeyinde henüz ergiyik halde iken çöküntü olur. Tüm kütüğün katılaşma sonrasında, Şekil 3. 17. b’de görüldüğü gibi, kütük düşey kesiti yaklaşık olarak V formunu alır ve baş boşluğu teşekkül eder. Bu kısım dıştaki havayla temasta olduğundan, iç yüzeylerde oksidasyon meydana gelir. Bu nedenle de, dövme ya da haddelemede kaynama olmaz. Bundan dolayı, boşluk içeren baş kısmın şekillendirme öncesinde kütükten kesilerek ayrılması gerekir. Bu boşluğun en belirgin görülmesi sac malzemelerde katmer (Şekil 3. 18.) şeklinde olur.



Şekil 3. 18. Saccan imal edilmiş bir dövme parçasında katmer durumu[22]
Üst: makro yapı, Alt: Mikro yapı

Kaynar dökülmüş çeliklerde hacim azalması, kütüklerde teşekkül eden CO hacmi nedeniyle dengelenir. Bundan dolayı baş kısımlarda boşluk ve katmer olmaz (Şekil 3. 17. a). Bu ve diğer yararlı özelliklerine karşın, blok segregasyonları istenmeyen durumdur.

Kaynar çeliklerin temiz yüzeyli olması, baş boşluğu ihtiva etmemesi ve sakin dökülmüş çeliklerin pek az, hatta hiç bileşim farklılığı bulundurmaması avantajları, iki yöntemin iyi özelliklerini birlikte içeren yarı sakin dökülmüş çeliklerin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu yöntemde izlenebilecek birinci yol, önce kokil içerisine kaynar döküm yapılır. Dökümde ya da dökümün sona ermesinden sonra, alüminyum ilavesiyle CO teşekkülü kesintiye uğratılır. Çelikler, silisyum ihtiva etmezler ve bu çeliklerde segregasyonlar (bileşim farklılığı) çok düşük seviyede kalır. İzlenebilecek ikinci yol ise, deoksidasyon maddesi dökümden önce katılır, ancak miktarı katının yanında gaz formunda da oksidasyon ürünü teşekkül edecek ölçüde tutulur. Bu çelikler, pek az miktarda silisyum (yaklaşık % 0,08 Si) içerirler. Genel olarak, yarı sakin dökülmüş çeliklerin homojenliği ve dayanımı sakin

dökülmüş çeliklere, yüzey temizliği ve baş boşluğu kaynar dökülmüş çeliklere yakındır.

Kaynar çeliklerin temiz yüzeyi, daha uygun talaşlı şekillendirme sağlar ve en önemlisi, emaye ya da galvaniz gibi işlemler için daha uygundur. Ayrıca, daha iyi derin çekilebilir ve kaynak edilebilirler. Bu özellikler daha çok, düşük karbonlu kütle halinde üretilen çelikler için önemlidir. Kaliteli ve asal çeliklerin kullanılmasında, genellikle ısıtıl işlem de uygulandığından, karbon miktarının ve alaşım elemanlarının homojen olarak dağılması istenir. Bundan dolayı da, sakın dökülmüş çeliklerin kullanılması zorunludur.

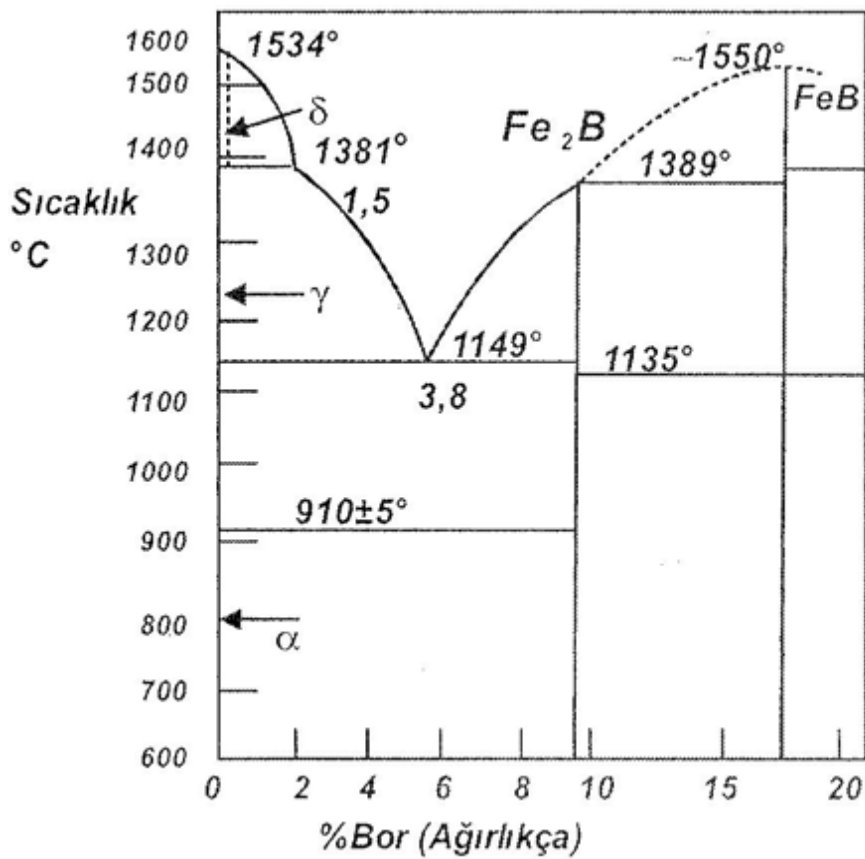
Özel sakın dökülmüş çeliklerde, ergiyik çeliğe mangan ve silisyuma ek olarak alüminyum katılıp, kalan oksijen Al_2O_3 'e, azot ise AlN'e dönüştürülür. Böylece, oksijenin yanında, şekil değiştirme yaşanmasına neden olan azotun yapıyı kırılgan yapıcı etkisi de giderilmiş olur. Ayrıca, AlN parçacıklarının katılaşmada çekirdek rolü oynaması, yapının da ince taneli olmasını sağlar. Sonuçta, dayanım ve süneklik karakterleri olumlu yönde değişir. Akma sınırı ve çentik darbe dayanımı artar, darbe geçiş sıcaklığı düşer[24].

Demir olmayan metallerde uzun zamandan beri bilinen sürekli döküm yöntemi, çelikler için de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek ölçü tamlığı ve küçük tane büyüklüğü yanında, ayrıca malzeme tasarrufu sağlaması, bu yöntemin en belirgin üstünlüğüdür.

4. DEMİR - BOR BİLEŞİKLERİ

4.1. Demir - Bor Denge Diyagramı

Demir Bor ikili faz diyagramına bakıldığında metaller arası iki bileşik görülmektedir. Bunlar; FeB ve Fe₂B bileşikleridir. Ferrobor alaşımları FeB ve Fe₂B gibi metaller arası bileşiklerden oluşmaktadır. 1538 °C’de ergiyen demir ve 2092 °C’de ergiyen borun oluşturduğu sistemde FeB ortorombik kristal yapıya sahip olduğu ve birim kafesin 4 Fe ve 4 B atomlarından meydana geldiği bilinmektedir[3]. Fe₂B ise, tetragonal kristal yapıya sahip olup, 12 atom noktası içerir.[18]



Şekil 4.1. Demir - bor denge diyagramı[36]

Şekil 4.1. de görülen Fe - B ikili denge diyagramında Fe₂B’nin bileşiminde % 8,83, FeB’nin bileşiminde ise % 16,2 bor bulunmaktadır. İkili denge diyagramına göre % 9-16 arasında bor içeren alaşımda faz dağılımı Fe₂B 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[17,37].

Bor çeliklerde katı halde ppm mertebesinde çözülebilmektedir. Borun atom çapı demirin atom çapından % 25 daha küçük olduğundan bu element ile katı eriyik yapılabilir[38]. Demir alaşımlarında alaşım elementlerinin genellikle atom çaplarına bağlı olarak arayer elementi olarak çözünebileceği bilinmektedir. Bu gerçekten hareketle, bor α - Fe'de hem yeralan hem de arayer olarak bulunmaktadır. Düşük sıcaklıklarda demir içerisinde borun çözünürlüğü karşılaştırıldığında 1/50 oranında arayer atomu olarak çözünmektedir. Difüzyon araştırmaları, α - Fe'de bor yayılımı için gerekli aktivasyon enerjisinin, yeralan katı eriyik için beklenen mertebede olduğunu göstermiştir. B - Fe ile yapılan difüzyon çalışması verileri aktivasyon enerjisinin arayer çözünürlük için uygun olduğunu göstermiştir.

Bor, α , γ ve δ demirde 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 çözünmektedir. Çözünebilirliğin genişliği, esas malzemenin saflığı ve tane boyutundaki değişiklikleri belirler. Fe ve B arasında Fe₂B (% 8,83 B), FeB (% 16,23 B) bileşikleri ve 1149 °C'de , % 3,8 B bileşiminde bir ötektik nokta oluşur. Dolayısıyla borlanmış yüzey 1149 °C'ye kadar ısıdan etkilenmez. Fe - B sisteminde alaşım elementleri, örneğin % 1 ötektik sıcaklığını 50°C aşağıya düşürmektedir[14,36,39].

4.2. Ferrobor

Ferrobor ilk olarak 1893 yılında Henri Moissan tarafından karbon astarlı ve tek fazlı bir elektrik ark fırınında elde edildi. Burada fırına yüklenen sarj; demir-asit borik ve kömürden ibarettir[18].

Karbon ve alaşımlı çeliklerin sertliğini arttırmak amacıyla, ferrobor kullanımı 1930'lu yıllardan beri bilinmektedir. Çeliğe % 0,003 - 0,004 miktarlarında bor ilavesi

ile, tane boyutunda küçültmeye ihtiyaç duymaksızın sertliği arttırabilir. Bu az miktardaki bor ilavesi ile, yüksek oranda manganez, nikel, krom gibi metalleri içeren alaşımlar ile aynı sertlikte malzeme üretilmiştir. Özellikle ABD’de ıslah çeliklerinde, pahalı ve az bulunan Nikel ve Molibdenin 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, konvansiyonel tane yönlenmiş silisyumlu saclara göre 1/3 oranında çekirdek kayıplarını azaltmıştır[40].

Bor, 1982 yılından beri tanınmakta olan Fe-R-B (R=nadir toprak metali) 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. Bor konsantrasyonunun % 0,32’den fazla olan alaşımlarda koruyucu etkisi bulunan $\text{Fe(BO}_2)_2$ fazı oluşmaktadır[41].

4.3. Çelik Üretiminde Ferrobor

Ferroborun en çok kullanıldığı alanlardan biri çelik sanayidir. Çeliğe ilave edilen çok düşük oranlardaki bor, hem yalın 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. Bor, çeliğe ilave edilen diğer sertleştirici elementlerin, örneğin karbon, manganez,

krom, molibden, 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[41].

Borun oksijen ve azota karşı ilgisi yüksektir. Bu nedenle bor, çelik içinde çözünmüş olan oksijen ve azot tarafından bağlanır. Bunu önlemek için bor, bu iki elementten korunmalıdır. Boru oksijenden korumak için sıvı çelik; kalsiyum, alüminyum ve silisyumdan herhangi birini veya birkaçını kullanılarak ön deoksidasyona tabi tutulur. Titanyum (Ti) veya Zirkonyum (Zr) kullanmak suretiyle de, sıvı çelik içindeki azotun bor yerine Ti veya Zr ile reaksiyona girmesi sağlanır[18].

Bor, çeliğin sertliğini karbür oluşturmak suretiyle arttırır. Diğer karbür yapan elementlerle kıyaslandığında, çeliğe aynı derecede sertlik kazandırmak için çok az bor ilâvesi gerekir.

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. Karbon oranları, % 0,15 ile % 0,45 arasında değişir. Borlu çelikler başlıca sertleştirilmiş ve temperlenmiş, bazı hallerde ise yüzey sertleştirilmiş koşullarda kullanılırlar. Borlu çelikler başlıca alimünyum ile deokside edilirler. Deoksidasyon sonucu yapıda % 0,003 oranında alimünyum kalır. Borlu çeliklere, genellikle (% 0,03 Ti'lu), nitrürosyon işlemi de uygulanır[7,41].

Östenitik çeliklere % 0,0005 oranında ilave edilen bor, çeliğin yüksek sıcaklık mukavemeti ile sürünme mukavemetini iyileştirir. Yüksek hız çeliklerinin kesme performansını arttırmak için, bu çeliklere de bor ilave edilmektedir.

18 - 8 Krom-Nikelli östenitik paslanmaz çeliklere ilave edilen bor, çökeltme sertleşmesi yaparak çeliğin elastik limitini arttırır, fakat oksitlenme direncini düşürür.

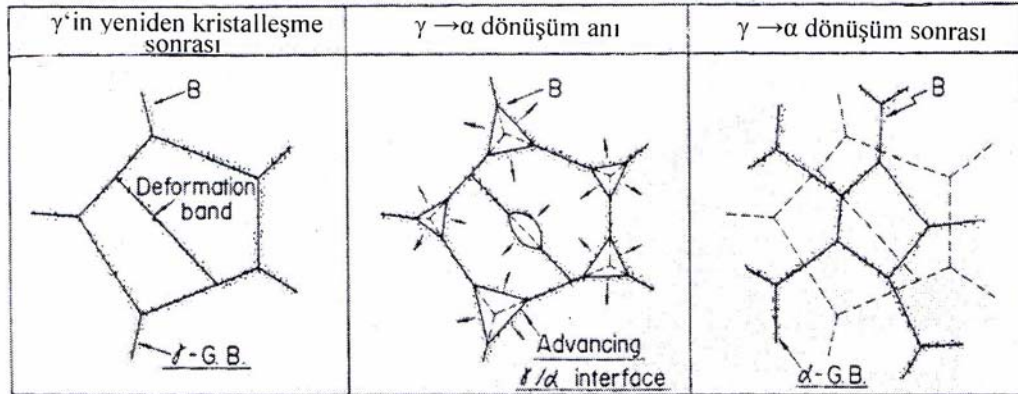
AISI 321 östenitik paslanmaz çeliğe % 0,01'e kadar bor ilavesi, bu çeliğin 650 °C sıcaklıkta ve 157 N/mm²'lik gerilme altında, kullanım ömrünü 8000 saatten 18000 saate uzatır. Krom-Nikelli ASTM 316 paslanmaz çeliklerinde % 0,004 - 0,009 oranlarında bor, şekil verme aralığında (950 - 1250 °C) çeliğin şekil alma kabiliyetini önemli derecede artırır. Östenitik ısıya dayanıklı paslanmaz çeliklerde ve ferritik çeliklerde çok düşük oranlarda (% 0,002 - 0,005) bor; titanyum, molibdenyum ve niobyum ile birlikte kullanıldığında çeliğin sürünme özelliklerini iyileştirir. Yapısında % 2,5'e kadar bor bulunan çelikler, nükleer reaktörlerde kontrol çubuğu olarak kullanılır[41].

Bor, çelik içerisinde aşağıda belirtilen şekillerde oluşabilir,

- a) Çözülmüş bor ‘‘Serbest Bor’’ (çoğunlukla tane sınırlarında çökelti oluşturmuş şekilde),
- b) Oksitlenmiş Bor (B₂O₃)
- c) Bor Nitrür (BN)
- d) Bor Karbür (M₂₃(B,C)₆)
- e) Ferrobör (Fe₂B, FeB)

4.4. Serbest Bor (Efektif Bor)

Bor ilaveli olarak üretilecek çeliklerde, mekanik özelliklerin iyileştirmesinde ilk parametre ‘‘Çözülmüş Bor’’ miktarıdır. Çünkü östenitleme sırasında bor karbürlerin çözünmesi sonucu oluşan bor (serbest bor), ıslah sırasında ince bor karbür M₂₃(B,C)₆ bileşiği halinde tane sınırlarında çökerek malzemenin sertleşebilirliğini, akma ve çekme dayanımını arttırmaktadır(Şekil 4.2.). Tane sınırlarında çökelen bor karbürler toplam bor miktarının ancak küçük bir kısmını oluştururlar. Kalan serbest bor ise ‘‘Efektif Bor’’ olarak adlandırılır ve önemli olan efektif bor miktarının elde edilmesidir.



Şekil 4.2. Östenitten ferrite dönüşümü esnasında tanelerde meydana gelen değişiklik[42]

Çözülmüş bor ‘‘Serbest Bor’’ (çoğunlukla tane sınırlarında çökelti oluşturmuş şekilde) tane sınırlarında ve tane içerisinde arayer ya da yeralan 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. Arayer ya da yeralan olarak tane içerisinde hangi katı eriği oluşturduğu tam olarak bilinmemektedir.

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 çözülmemektedir. Çözünebilirliğin genişliği, esas malzemenin saflığı ve tane boyutundaki değişiklikleri belirlemektedir.

4.5. Bor Oksit (B_2O_3)

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.

4.6. 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[43].

Bor nitrür doğada tabii halde bulunmaz. 19. yüzyılın başlarında elde edilmesine rağmen ticari anlamda 20.yüzyılın ikinci yarısında üretilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır.

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 Pirolitik Bor Nitrür'dür. Bunlar çok farklı fiziksel özelliklere sahiptirler ve çok farklı uygulamalarda kullanılırlar. Hegzagonal bor nitrürün kalitesine göre ticari sınıflandırılması ve kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.1.'de görülmektedir[43,44,45].

Çizelge 4.1. Bor nitrür ticari kalite sınıflandırması [43]

Bileşenleri	Kompozisyon (%)		
	Refrakter kalite	Seramik kalite	Yüksek kalite
BN	92 - 96	> 98,5	> 99,5
B ₂ O ₃	5 -7	0,1	< 0.03
Oksijen*	5	0.5 -1.5	0.3
Karbon	0.1	0.1	0.1
Metal kalıntıları	0.2	0.2	> 0.01

4.6.1. Altıgen bor nitrür

Kristal yapısı, tabakalı olması ve kayganlık ve yumuşak özellikleri nedeniyle grafit benzer. Beyaz grafit olarak ta adlandırılır. Bazı fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikleri, grafitle ve refrakter kullanımda rakip malzeme olan alümina ile kıyaslamalı olarak Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Bor nitrürün diğer yüksek sıcaklık malzemeleri ile kıyaslamalı olarak özellikleri[37]

Özellikler	BN	Alümina	Teknik Grafit
Yoğunluk	2,15 - 2,20	3,7 - 3,9	1,66 ± % 10
Sertlik	Mohs 2	Mohs 9	-
Erime noktası	>3000 °C İn N ₂ 2730 °C	2015 °C	3700 ± 100 °C
Elektrik direnci Ohm-cm	1,7*10 ¹³ (at 25 °C) 3,1*10 ⁴ (at 1000 °C)	1*10 ¹⁶ (at 14 °C) 3*10 ¹³ (at 300 °C)	109*10 ⁻⁶ (at 25 °C) 8-15*10 ⁴ (at 1000 °C)
Dielektrik katsayısı	4,15	9,0 - 10,0	-
Termal genleşme katsayısı (cm/cm °C*10 ⁻⁶)	0,7(⊥) 7,5 (//)	6-10	32(⊥) 46(//)
Çalışma Sıcaklığı (°C)			
Havada	1000	1600 - 1700	330
Azot ortamında	3000	2000	1650
Klor ortamında	700	-	-
Termal iletkenlik Watt/metre °C	36 (//) 34 (⊥)	17 - 30	138(//) 95(⊥)

Hegzogonal bor nitrürün özellikleri

- Hegzogonal bor nitrür yapısal yönden grafitte, görünüm olarak alüminaya benzeyen, beyaz renkte, zehirsiz, geçirimsiz ve kaygan bir malzemedir.
- Seramik malzemeler içinde en düşük yoğunluklu olanıdır. ($2,27 \text{ g/cm}^3$)
- Çok yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. (inert atmosferde $3000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar, hava ortamında $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar).
- Isıl şok direnci oldukça yüksektir. $0 - 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ arasındaki ısı şoklarına karşı dayanıklıdır.
- Birçok ergimiş metal veya cüruflar ve ergimiş camlar tarafından ısılatılma özelliği düşüktür.
- Mükemmel elektrik yalıtım özelliğine ve ısıl dirence sahiptir.

4.6.2. Kübik bor nitrür

Kübik bor nitrür kristal yapısı ve diğer özellikleri yönünden elmasa benzer. Saf kübik bor nitrür renksiz, iyi bir elektrik yalıtkanıdır.

Yüksek sıcaklık ($1500 \text{ }^\circ\text{C}$), yüksek basınç (8 GPa) teknikleri ile hegzagonal kübik kafes dönüşümü ile elde edilen kübik bor nitrür c (BN), elmastan sonra ikinci en yüksek sertlik değerine sahiptir[45,46,47]

Kübik bor nitrür özellikleri

- Elmasın aksine yüksek ısıl dirence sahip olup, çok yüksek sıcaklıklara ($1370 \text{ }^\circ\text{C}$) dayanıklıdır.
- Elmas gibi çok yüksek ısıl iletkenliğe sahiptir.
- Mekanik şoklara karşı dayanımı yüksektir.

Üretim metodu

Kübik bor nitrür, hegzagonal bor nitrürün yüksek sıcaklık(1400 °C ve 1700 °C'ler arasında) ve yüksek basınç (60.000 atm) altında ısıtılmasıyla elde edilir.

4.6.3. Pirolitik bor nitrür

Pirolitik bor nitrürün kullanma alanları kısmen sıcakta sıkıştırılmış bor nitrürle çakışır. Bu yüzden potalarda ve fırın parçalarında kullanılabilir. Çeşitli tiplerdeki kalıp şekilleri ve kalıpların kaplanması ve sıcakta çalışan memelerin üretiminde kullanılmaya uygundur. Pirolitik bor nitrürden ayrıca ısı kalkanı, elektrik kablolarının ısı izolasyonu, indüksiyon ısıtma bobinleri taşıyıcıları, elektrik dirençleri ve yüksek sıcaklık kondansatörleri, infrared cam ve plarizatörleri üretilebilir[45,46,47].

4.6.4. Bor nitrürün üretim metodları

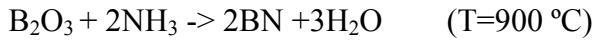
Bor nitrür endüstriyel alanda aşağıda açıklanan dört yolla üretilmektedir. Bunlardan birinci metod; karbon, bor oksit ve azot gazının 1450 - 1650 °C arasında reaksiyona sokulmasıdır. Bu reaksiyon aşağıda görülmektedir. Literatürden edinilen bilgiye göre bu metod, dünyada bor nitrür üretiminde en yaygın olan işlemidir.

a) Bor nitrür üretiminde kullanılan birinci metotta, önce B₂O₃ ve kömür tozları karıştırılıp bir paketleme diskinde paketlenmektedir. Bu paketler elektrik ısıtmalı bir fırına yüklendikten sonra azot gazı ortamında yaklaşık 2 saat süreyle 1450 - 1650 °C de ısıtılmaktadır. Böylece, aşağıda verilen reaksiyona göre bor oksit, karbon tarafından redüklenmekte ve açığa çıkan bor ise derhal azot ile reaksiyona girerek bor nitrür oluşturmaktadır.

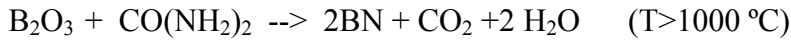


Üretilen bor nitrür yaklaşık olarak % 92 BN içermektedir, içinde emprüte olarak B_2O_3 ve kül vardır. Fırından alınan ürün, içindeki emprütelerin uzaklaştırılması için, 1/1 oranında karıştırılmış hidroklorik asit/su çözeltisinde liç edilmektedir. Liç çözeltisi disk filtreden geçirilmek suretiyle, bor nitrür filtrede tutulmaktadır. Buradan elde edilen bor nitrür refrakter ve seramik kalitelerde olmaktadır.

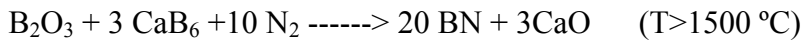
b) İkinci yöntem; bor oksitin amonyak gazı ile inert bir dolgu malzemesinin (genellikle trikalsiyum fosfat) varlığında 900 °C 'de nitrülenmesi ve reaksiyon sonrası saflaştırma ve kristalizasyon amacıyla ısıtma işlem uygulanması



c) Üçüncü yöntem; bor oksit veya boraksın, üre ve melamin gibi azot içeren organik bileşikler ile 1000 °C'nin üzerinde nitrülenmesi



Sonuç olarak; Kalsiyum hekzaborür ve bor oksitin, azot gazı ile 1500 °C'nin üzerinde nitrülenmesi.



Yukarıdaki yollarla üretilen bor nitrür grafit gibi tabakalı bir yapıda, beyaz renkte, pudra halindedir[47,48,49].

4.6.5. Bor nitrürün kullanım alanı

- Sıcak ve ergimiş metallerle temas eden yüzeylerde kaplama olarak kullanılır. Bor nitrür kaplama, korozyonu ve kimyasal olarak malzemenin reaksiyona girmesini önler. Bu nedenle de, kalıpların yüzeyinin kaplanmasında kullanılır.
- Aynı amaçlarla cam ve plastik endüstrisinde de kullanılır.
- Kompozit üretiminde bor nitrür kaplamalar kalıbın oksitlenmesini önler.

- Yüksek sıcaklıklarda yağlayıcı olarak kullanılır.
- Yüksek ısıl şok direncinin ve yüksek tokluğun istendiği uygulamalarda kullanılır (potalar ve refrakter astar uygulamaları dahil).
- Yüksek dielektrik dayanımı, düşük dielektrik sabiti ve yüksek ısıl iletkenliğine haiz olması sebebiyle, dielektrik malzeme olarak elektronik ve elektroteknik endüstrisinde kullanım alanına sahiptir.
- Bor nitrür, belli oranlarda silisyum nitrür ile karıştırılarak (60:40, 50:50 veya 40:60) nozül pota, termokupul kılıfı ve cam kalıplarla ilgili refrakter malzeme olarak kullanılır.
- Diğer seramik malzemelerle birlikte kompozit yapımında kullanılır (Örneğin; Al_2O_3/BN , AlN/BN , $3Al_2O_3.2SiO_2.xZrO_2/BN$).
- Kozmetik endüstrisinde kullanılır.
- Seramik ve cam endüstrisinde kullanılır (pota, destekleyici vb. malzeme olarak).
- c(BN) çok yüksek ısıl iletkenliği sebebiyle kesme aletlerinde (cutting tools) kullanılır. Elmasın aksine yüksek ısıl dirence sahip olup, çok yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır (1370 °C'ye kadar). Elmasla karşılaştırıldığında kübik bor nitrürün en önemli avantajı, demir veya diğer metaller ile temasında veya havada yüksek sıcaklıkta sahip olduğu çok yüksek kararlılığıdır. Çok kristalli kübik bor nitrür endüstriyel alanda son birkaç yıldır kullanım alanı bulmaktadır. Ferro malzemeler ile reaksiyon direnci ve mükemmel abrasif direnci ile kombine edilen c(BN) diğer takım malzemelerden daha yüksek sıcaklıklarda ve daha yüksek hızlarda sert malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır.
- c(BN) sertleştirilmiş çeliklerin işlenmesinde kullanılır. Bor nitrür kesici aletler, işlenme esnasında sıvı kullanılmadan çok yüksek hızlı işlenme için uygundur.
- c(BN) yüksek sıcaklıklarda kesici alet ve aşındırıcı olarak kullanılır.
- c(BN) mekanik şoklara karşı yüksek dayanımı sebebiyle dökümle ve dövmeyle üretilen parçaların işlenmesinde kullanılır.
- c(BN) aşındırıcı malzeme olarak kullanılır (küçük kristaller halinde aşındırıcı diskler içerisine ilave edilerek demirli metallerin aşındırılmasında kullanılır). Yüksek sertliği ve yüksek sıcaklıklara dayanımı sebebiyle kübik bor nitrürden üretilmiş parçalar yüksek dayanıma ve uzun ömre sahiptirler. Ayrıca, yüksek ısıl

iletkenliğe sahip olması, aşındırıcı disk olarak kullanım esnasında oluşan ısının kolaylıkla uzaklaştırılabilmesinde bir avantajdır.

- c(BN) 50 HRC'den daha sert demir bazlı malzemelerin ve 35 HRC'den daha yüksek sertliğe sahip kobalt ve nikel bazlı malzemelerin taşlanması, işlenmesinde ve parlatılmasında kullanılır.

4.7. Bor Karbür

Bor karbür (B_4C) siyah parlak renkli bir malzeme olmasından ve sertliğinden dolayı (3000 Knoop) kara elmas olarak da adlandırılır. Yoğunluğunun düşük olması ($2,37 \text{ g/cm}^3$ ile $2,52 \text{ g/cm}^3$ 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 (B_4C) 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[50].

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 bunun sonucu olarak da gövde bölgesinin 760 °C burun 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 eksturze 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 ısıl-çift üretimidir.

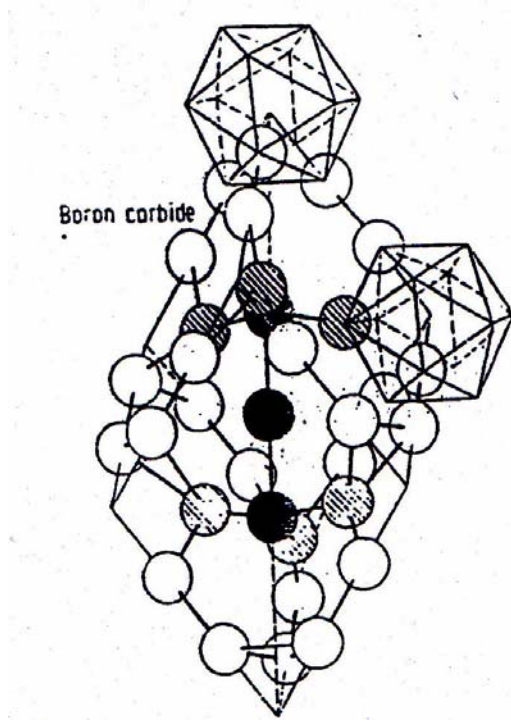
Otomobil teknolojisine sağladığı % 10'luk ağırlık tasarrufu ile % 5'lik yakıt tasarrufu, ayrıca içten yanmalı motorlarda ve diğer hareketli makine parçalarında aşınma direnci ve ısıl şoklar önem taşımaktadır[51-54].

4.7.1. Bor karbürün yapısı

Bor karbür bileşiği ilk defa 1883 yılında keşfedilmiştir. Refraktör bor bileşiklerinden biri olan bor karbür; alümine, silikon 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[51-54].

Termodinamik olarak rombohedral bor karbür bileşikler kararlıdır. Rombohedral bor karbürün ($B_{4-3}C_{12}$) birim hücre mikro yapısı Şekil 4.3.'de görüldüğü gibi tahmin edilmektedir[56]. 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[55].



Şekil 4.3. Bor karbürün rombohedral birim hücresi [56]

4.8. FeB ve Fe₂B (Borlama İşlemi)

Bor ile yüzey sertleştirme işlemi, diğer bir ifadeyle borlama, termo-difüzyonal bir işlem olup esas olarak borun yüksek sıcaklıkta FeB ve Fe₂B oluşturarak çeliğe yayınıdır. Borlama, karbürizasyon ve nitrürasyona benzeyen bir difüzyon işlemi olup sadece metallere değil, sermet ve seramik malzemelere de uygulanabilmektedir. Borlamanın diğer yüzey sertleştirme işlemlerinden üstünlüğü; yüzey tabakasının çok sert olmasının yanında yüksek aşınma, korozyon ve yüksek sıcaklıkta oksidasyon direncine sahip olmasıdır[37,38].

Genellikle borlama işlemi, 700 - 1000 °C sıcaklık aralığında 1-10 saat sürelerde çeşitli borlama ortamlarında gerçekleşmektedir. Borlama ortamı katı, sıvı ve gaz olup bor kaynağı (B₄C, Na₂B₄O₂, H₂B₆), aktivatör (KBF₄), dolgu malzemesi ve deoksidasyonlardan meydana gelmektedir. Burada aktivatörler tabakanın düzenli büyümesini sağlarken, dolgu ve deoksidasyon malzemeler işlem sıcaklığında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluşturmakta ve ayrıca ortamdaki malzemelerin ana malzemeye yapışmasını önlemektedir[37,39,40].

Borlama işleminin en önemli karakteristik özelliği, elde edilen borür tabakasının çok yüksek sertlik (1450 - 5000 HV) ve ergime sıcaklığına sahip olmasıdır. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan sementasyon ve nitrürasyona göre çok daha yüksektir. Borür tabakasının yüksek sertlik değeri ve düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olması, aşınma direncinin oldukça yüksek olmasını sağlamaktadır. Tungsten karbürün, elektrolitik sert krom kaplamaların ve sertleştirilmiş takım çeliklerinin sertlik değerlerine borlama işlemi ile ulaşmak mümkündür[7,36,37,41,62].

Çizelge 4.3. Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması[62]

Malzeme	Mikrosertlik, HV5
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 kalıp çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540 - 600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630 - 700
Yüksek hız çeliği BM42	900 - 910
Nitrürlenmiş çelik	650 - 1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650 - 950
Sert krom kaplama	1000 - 1200
Sementit karbürler, WC + Co	1160 - 1820 (30 kg)
Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ seramikler	1483 (30 kg)
Al ₂ O ₃ + TiC + ZrO ₂ seramikler	1730 (30 kg)
Sialon seramikler	1768 (30 kg)
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	~10000

Borür tabakasının bazı avantajlarını sıralamak gerekirse, bunlardan ilki, yüksek sıcaklıkta (550 °C - 600 °C) borür tabakasının sertliğinin muhafaza edilmesidir. Özellikle sertleşebilir birçok çelik grubuyla kıyaslanabilir yüzey özellikleri elde edilebilmektedir. Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksidan olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon dirençlerini artırmaktadır. Bu özellikleri sebebiyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Borlama işlemi ile, düşük alaşımlı çeliklerin, H₂SO₄, H₃PO₄ ve HCl gibi asitlere

karşı direncini artırmak mümkündür. Borlanmış yüzeyler çok yüksek sıcaklıklarda (850 °C) orta özellikte oksidasyon direncine ve oldukça yüksek ergimiş metal korozyon direncine sahiptir. Borlanmış parça, oksidan ve koroziv ortamlarda üstün bir yorulma ömrüne sahiptir. Ayrıca borlama işlemi, yağlayıcı kullanımını azaltmakta, soğuk birleşme eğilimini ve sürtünme katsayısını düşürmektedir[36,37].

Borlama işlemi, birçok avantajının yanında bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Borlama tekniği esnek değildir ve gaz ortamında sementasyon ve plazma nitrürasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre maliyeti daha yüksektir. Gaz karbürizasyonu ve plazma nitrürasyonu daha esnek tekniklerdir. Bu teknikler, daha az işçilik ve daha düşük maliyet gerektirir. Ayrıca bu işlemlerin kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi borlamaya göre avantajlar sağlamaktadır. Bu sebeple, yüksek sertlik, dış ortamlara karşı yüksek aşınma direnci ve yüksek korozyon direncinin arzu edildiği durumlarda borlama işlemi tercih edilmektedir. Borlamaya tabi tutulan malzemelerde bor tabaka kalınlığının % 5 - 20'si oranında boyutsal olarak artış gözlenmektedir. Örneğin, 25 mm'lik bir tabaka kalınlığı, 1.25 - 6.25 mm'lik bir büyümeye neden olmaktadır. Bu kalınlık artışı borlanan malzemenin cinsine ve borlama şartlarına bağlıdır. Çok hassas toleranslarla çalışmak gerektiği zaman, elmas takımlarla kaplamanın işlenmesi mümkündür, zira yüzeyin geleneksel tekniklerle işlenmesi kaplama tabakasında kırılmalara neden olmaktadır. Bu da kaplama kalitesinde bozulmalara ve çatlamalara yol açmaktadır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusudur. Takım çeliklerinde borür tabakasının özelliklerinin korunması için inert atmosfer veya vakum gerekmektedir[37].

Alüminyum, krom, silisyum, vanadyum ve titanyum gibi elementleri borür tabakasının bünyesinde bulunduran termo-kimyasal işlem, çok fazlı borlama olarak bilinmektedir. Çok fazlı borlama, iki kademeli bir işlem olup, 850 - 1050 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada borlama işlemi, geleneksel yöntemlerden biriyle yapılmaktadır ve daha çok kutu borlama tercih edilmektedir. FeB fazının oluşumu iyi sonuçlar vermekte ve 30 µm civarında kaplamalar yeterli olmaktadır. İkinci aşamada, elementin tabakaya difüzyonu gerçekleştirilmektedir.

Kutu borlama sırasında oluşan sinterlemeyi önlemek için ortamdan Ar veya H₂ gazı geçirilmelidir. Çok bileşenli borlama altı gruba ayrılmaktadır[36,37,39,62]. Bunlar;

- Bor – alüminyumlama
- Bor – silisyumlama
- Bor – kromlama
- Bor – krom – titanyumlama
- Bor – krom – vanadyumlama
- Bor – vanadyumlamadır.

4.8.1. Borlama yöntemleri

Son teknolojik gelişmelerle beraber borlama işlemi temel olarak iki ana grupta toplanan yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Termo-kimyasal ve termo-kimyasal olmayan yöntemler olarak ayrılan bu yöntemlerden en çok kullanılanı termo-kimyasal yöntemlerdir.

Termo-kimyasal bor kaplama yöntemleri sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bor atomunun metale difüzyonu prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemler; sıvı borlama, kutu borlama, pasta borlama ve gaz borlama şeklinde sıralanabilir.

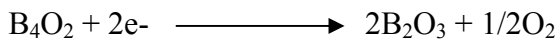
Termo-kimyasal olmayan yöntemler, fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey ve iyon biriktirme yöntemleri olup, bu yöntemler son yıllarda borlama işlemi gerçekleştirebilmektedirler[14,36,37,39,62].

Sıvı borlama

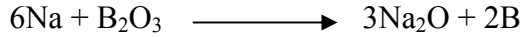
Bu yöntemde borlama banyosu sıvı haldedir. Borlama işlemi 670 - 1000 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. Sıvı ortamda borlama, elektrolitik sıvı borlama ve elektrolizle sıvı borlama olarak iki ana grupta toplanmaktadır.

Demir esaslı malzemelerin elektrolitik sıvı borlama işlemi, 900 - 950 °C sıcaklık aralığında, boraks esaslı eriyiklere % 30 B₄C ilavesi yapılarak gerçekleştirilmektedir. Borlama işlemi aynı zamanda, % 55 boraks, % 40 - 50 ferrobor ve % 4 - 5 ferroalüminyum ilavesiyle de yapılmaktadır. Nikel alaşımlarının borlanması, KBF₄:KF tuz banyosu, 670 °C'nin altındaki uygulamalarda 75:25 oranında kullanılarak düşünülen kalınlıkta bor tabakası elde edilebilmektedir. Aynı zamanda daha yüksek sıcaklıklarda demir esaslı malzemeler için de iyi sonuçlar sağlanmaktadır. % 55 boraks, % 45 B₄C karışımı ve 1:1 oranında NaCl ve BaCl₂ kullanılarak çok yüksek tabaka kalınlıkları elde edilmektedir. Sıvı borlama ayrıca, boraks, ferro-silis, borik asit ve sodyum sülfat (NaSO₄) esaslı tuz banyolarında da gerçekleştirilmektedir[29,60,62].

Tuz banyosunda elektrolizle borlama işleminde katot olarak, borlanacak demir esaslı malzeme ve anot olarak grafit elektrot kullanılmakta elektrolit olarak ise boraks kullanılmaktadır. Borlama işlemi, 900-950 °C sıcaklık aralığında 4-6 saat süre ile 0.15-0.20 A/cm² akım altında gerçekleştirilmektedir[29,60,62]. Parçanın her tarafında homojen bir kaplama tabaka kalınlığı elde edebilmek için elektroliz sırasında parça döndürülmektedir. Düşük alaşımlı çeliklerde çok ince kaplamaların eldesinde, yüksek akım yoğunluğu kullanılarak çok kısa sürelerde borlama yeterli olmaktadır. Alaşımlı çeliklerde ise kalın kaplama tabakalarının elde edilmesi için düşük akım yoğunluğu ve uzun sürelerde borlama işlemi gerekmektedir[37,62]. Yapılan araştırmalar borür tabaka kalınlığının borlama süresi, borlama sıcaklığı ve akım yoğunluğundaki artışa bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Ancak, tabakanın yapısal karakteri bu durumdan etkilenmemektedir[60]. Elektrolizle sıvı borlama işlemi sırasında, ergimiş halde tetraborat, borik asit ve elementel oksijene dönüşmektedir.



Bunu müteakip sodyum iyonları sayesinde katodun yanında normalize işlemi sonrası borik asit, bor iyonlarını oluşturmaktadır.



Bu durumda katoda yakın bölgede bol miktarda bor oluşturulmaktadır. Benzer şekilde iyi sonuçlar veren elektrolit bileşikleri aşağıda verilmektedir.

- $\text{KBF}_4 - \text{LiF} - \text{NaF} - \text{KF}$ karışımı 600 - 900 °C arasında,
- $20\text{KF} - 30\text{NaF} - 50\text{LiF} - 0.7\text{BF}_2$ karışımı (mol olarak) 800 - 900 °C arasında azot 10 hidrojen ortamında,
- 9:1 ($\text{KF} - \text{LiF}$) – KBF_4 karışımı argon atmosferinde,
- 90 (30 LiF + 70 KF) – 10KBF_4 karışımı 700 - 850 °C’de,
- $80\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 - 20\text{NaCl}$, 800 - 900 °C’de oluşmaktadır.

Kutu borlama

Kutu borlama, borlanacak malzemenin toz karışımı şeklinde bor verici ortam içerisinde belirli sıcaklık ve sürelerde bekletilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Borlanacak parçanın etrafı yeterli miktarda borlama tozuyla kaplanarak üst kısma dolgu malzemesi (SiC olabilir) doldurulup kapak hava girişi engellenecek şekilde kapatılır. Kutu borlamada çok farklı bor bileşenleri kullanılabilir. Bu bileşenler; katı bor kaynağı, akışkanlar ve aktivatörlerdir[37,40,61,62].

Yaygın olarak kullanılan bor kaynakları; bor karbür (B_4C), ferrobor ve amorf bordur. Ferrobor ve amorf bor çok iyi bor kaynakları olup kalın borür tabakası oluştururlar. Akışkan olarak SiC ve Al_2O_3 , aktivatör olarak NaBF_4 , KBF_4 , $(\text{NH}_4)_3\text{BF}_4$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 ve $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ kullanılmaktadır. Bu malzemelerin haricinde değişik ticari tozlar (örneğin Ekabor tozu gibi) borlayıcı ortam olarak kullanılmaktadır[62]. Kutu borlamada kullanılan pota, borlama işlemi boyunca bor kaynağının kaybını önlemek için kaplanarak tüm malzemeler doldurulduktan sonra ağız kısmı demir cürufu ile kapatılmaktadır. Pota veya kutu, yüksek iç gerilmeler, çatlaklar ve kalmalara sebebiyet vermemesi ve yeniden toz ilavesiyle (% 20 - 50) borlamaya devam edebilmesi açısından fırın hacminin % 60’ını geçmemelidir. Kutu borlama işlemi kolayca gerçekleştirilmesi, emniyetli olması, faz bileşenlerinin fazla

değişikliğe uğramaması ve özel ekipmana gerek duyulmamasından dolayı çok kullanılan bir yöntemdir[37,62].

Gaz borlama

Gaz borlama işleminde kullanılan bor taşıyabilen gazlar, bor halojenler veya bor hidrürlerdir. Gaz borlamada en çok kullanılan ortamlar aşağıda verilmektedir.

- Diborane (B_2H_6) – H_2 karışımı,
- Bor halid – H_2 /veya (75:25 N_2 - H_2) gaz karışımı,
- $(CH_3)_3B$ ve $(C_2H_5)_3B$ gibi organik bor bileşikleri

(B_2H_6) – H_2 karışımı, zehirli ve patlayıcı olma özellikleri sebebiyle ticari olarak kullanılmamaktadır. Organik malzemeler kullanıldığı takdirde borür ve karbür bileşikleri birlikte oluşmaktadır. BBr_3 , çok pahalı ve suyla olan kuvvetli reaksiyonu ayrıca yüksek sıcaklıkta kararlılığının ayarlanması için BF_3 'e ihtiyaç duyulması sebebiyle kullanım açısından tercih edilmemektedir. Gaz borlama işlemi için en çok BCl_3 tercih edilmektedir[37, 31, 33,62].

Pasta borlama

Pasta borlama, kutu borlamanın zor ve daha pahalı olduğu veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Hazırlanan borlayıcı karışım, malzemenin yüzeyine püskürtülerek 1-2 mm civarında tabaka oluşturulmakta ve kurutulmaktadır. İşlem, demir esaslı malzemelere geleneksel fırınlarda 800-1000 °C sıcaklık aralığında 5 saat süreyle uygulanmaktadır. Bu işlem koruyucu atmosfer olarak Argon, NH_3 veya N_2 kullanılmaktadır. Pasta borlama işleminde 1000 °C'de 20 dakika süre sonunda 50 µm kaplama kalınlığı elde edilebilmektedir. Büyük parçaların veya seçilmiş alanların borlanması için oldukça elverişlidir[37,62].

4.8.2. Borlanabilen malzemeler ve borürlerin genel özellikleri

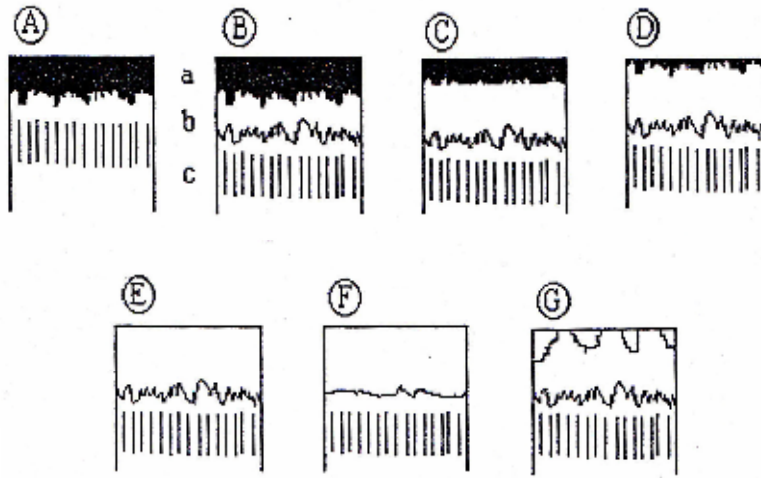
Borlama işlemi, sade karbonlu çelikler, düşük alaşımlı çelikler, takım çelikleri, paslanmaz çelikler ve dökme demirlere uygulanabilmektedir. Buna ilaveten; nikel, kobalt, molibden ve titanyum esaslı alaşımlara da uygulanmaktadır. Ayrıca, sinterlenmiş karbürlerin yüzeyleri borlanarak, aşınma dirençleri artırılabilir. Yumuşak kobalt ve nikel bağlayıcıların yüzeylerinde borür fazları oluşturmak mümkün olup, son yıllarda seramiklerde bor kaplamalar uygulanmaktadır[36,37,38,62].

Endüstriyel olarak borlama işlemi, alüminyum ve silisyum ihtiva eden yatak çelikleri haricinde yüzeyi sertleştirilmiş, temperlenmiş, takım ve paslanmaz çelikler gibi yapısal çeliklere, döküm çeliklerine, Armco demire (ticari saflıkta), gri ve küresel grafitli dökme demirlere, sinterlenmiş demir ve çeliklere uygulanabilmektedir[62].

Borlama işleminin östenit fazında gerçekleşmesi sebebiyle havada sertleşen çelikler, borlama sonrasında anında sertlik kazanırlar. Suda sertleşen parçalar borür tabakasının termal şoka maruz kalması sebebiyle su verilmesi gerekli olduğu durumlarda borlanma işlemi yapılmaz. Benzer şekilde sülfürlenmiş ve kurşunlanmış çelikler yüzeylerde çatlak oluşturma eğilimleri, nitrülenmiş çelikler ise çatlak hassasiyetleri sebebiyle borlama işlemine tabi tutulmaktadır[36,38,62].

4.8.3. Borür tabakasının yapı ve bileşimi

Borür tabakasının özellikleri, borlanacak malzemenin bileşimine, borlama metoduna, borlama ortamına ve işlem şartlarına (zaman, sıcaklık, v.s.) önemli ölçüde bağlıdır. Borlama işlemi sonucunda çeliklerde başlıca iki tabaka meydana gelmektedir. Bunlar; borür tabakası ve geçiş bölgesidir. Şekil 4.4.'de görüldüğü gibi geçerli olabilecek bir sınıflandırma işlemi geliştirilmiştir[62,63,64,65]. Bu sınıflandırma, kaplama tabakalarının bileşim ve belirleyici görünüşlerine bağlı olarak yapılmaktadır.



Şekil 4.4. Borür tabakalarının türleri [62]

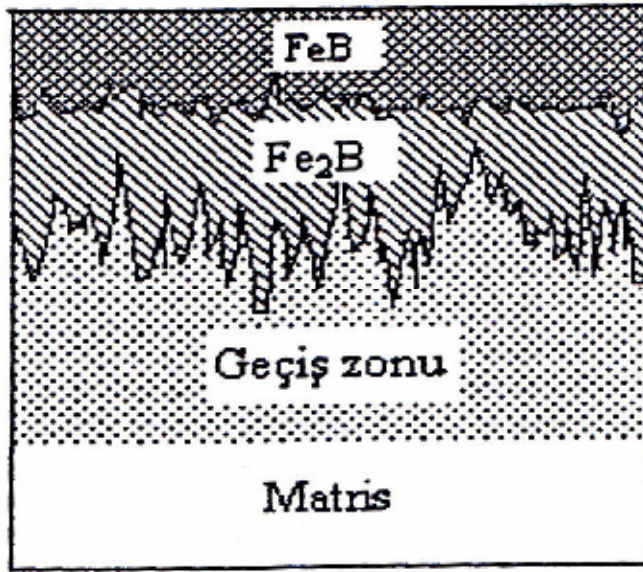
Bu tabaka türlerinin görünüşlerinden, kaplama yapısının özelliklerini belirlemek mümkün değildir ancak malzemenin yüzeyinde oluşan borür tabakasının kolonsal yapılu oluşu tamamen tabakanın görünüşü hakkında bilgi vermektedir. Oluşturulan bu sınıflandırma sistemi borür tabakasının görünüşünü karakterize etmek ve borlama işleminin uygun olup olmadığına karar vermek için imkân sağlamaktadır[62].

Bu borür tabaka türlerinden E ve F grubu borürler endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu tip tabakalar her zaman elde edilmeyebilir. Özellikle kalın tabakalarda daha çok D tipi borür tabakası elde edilmektedir. Yüksek silisyum veya alüminyum ihtiva eden çeliklerde, bu elementlerin kaplama-matris ara yüzeyinde birikerek yumuşak ferrit fazı oluşturmaları sebebiyle, borlama işlemi tercih edilmektedir(Şekil 4.4. G tipi). Borlama işlemi sonucunda elde edilen tek fazlı borür tabakası (Fe_2B) birçok avantaja sahiptir. Bunlardan birkaçı arasında, kırılgan olmaması, borlama sonrası ısıtıl işlem sırasında kaplama tabakasının matrise iyi yapışma mukavemetine sahip olması ve kaplamanın özellikleri yer almaktadır. Difüzyon yönüne bağlı olarak, kolonsal yapı sergileyen tek fazlı Fe_2B fazı, çift fazlı $\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$ fazlarına göre daha çok tercih edilmektedir. Gerçekte FeB ve Fe_2B fazları birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler sebebiyle, iki faz arasında yüzeye paralel veya dik ilerleyen çatlaklar oluşturmaktadır. Fe_2B basma, FeB fazı çekme etkisi yapmaktadır. Genellikle $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$ ara yüzeyinde, FeB fazının çekme gerilmelerine Fe_2B fazının ise basma

gerilmelerine maruz kaldığı ileri sürülmektedir. Bu yüzden termal şok veya mekanik etkiler altında ayrılmalar ve tabaka halinde kalkmalar meydana gelmektedir. Bu sebeple, minimum FeB içeriğine sahip kaplama tabakaları elde edilmeye çalışılmaktadır. Örneğin, takım çeliklerine uygulanan borlama işlemi sonrasında darbeli gerilmeler altında çalışması durumunda, çok kalın tek fazlı kaplamalarda çatlaklar oluşmaktadır. Zira Fe_2B fazının termal genleşme katsayısı çeliğinkine yakındır[36,37,39,62].

4.8.4. Demir borürlerin büyüme mekanizmaları ve özellikleri

Borlama işleminde hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın karbon çeliklerinde yüzeyde iki tür borür fazı oluşabilmektedir. Genellikle oluşan borürlerin kolon şeklinde büyüdüğü görülmektedir. Oluşan borür tabakasında en dış yüzeyde FeB fazı, matrise doğru Fe_2B fazı ve bu fazın altında geçiş bölgesi yer almaktadır. FeB fazı ile Fe_2B ve Fe_2B ile matris ara yüzeyindeki yapının kolonsal olduğu bilinmektedir(Şekil 4.5.). Ancak, yüksek alaşımlı çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabakası ve büyüme mekanizmasına etkisinden dolayı, ara yüzey yapısının kolonsal yerine düz ve kompakt olduğu belirtilmektedir[37,62]. Alaşım elementlerinin matris ve borür tabakası içerisindeki çözünürlüklerine bağlı olarak, matrisin yakınında oluşturdukları bileşiklerin borlama mekanizmasını etkilemesinden dolayı borür tabakasının yapısı değişmektedir. Alaşım elementleri genellikle borun difüzyonunu engellemektedir[62].



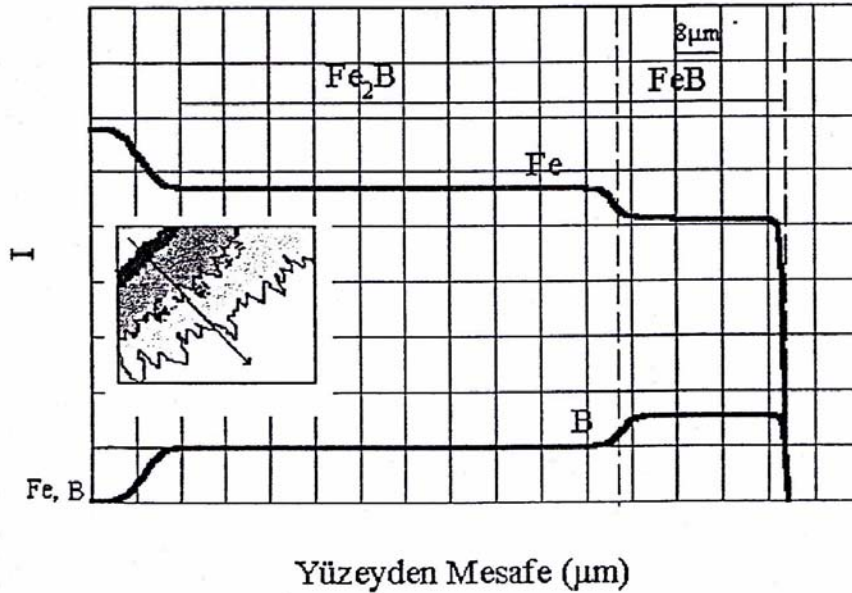
Şekil 4.5. Borür tabakasının şematik olarak gösterilişi[62]

Borür fazlarının oluşumu, borlama ortamının aktif bor konsantrasyonuna bağlı olarak, tane sınırları ve dislokasyonlar gibi mikro hataların, yüzey pürüzlülükleri ve çizikleri gibi makro hataların, bulunduğu bölgelerde başlamaktadır. Birçok araştırmada, hacim merkezli tetragonal yapıya sahip Fe_2B fazının çoğu zaman, yüzeye dik olan $[001]$ yönünde, borun en kolay şekilde difüze olduğu belirtilmektedir[62]. Diğer taraftan kuvvetli bir kolonsal büyümenin (002) düzleminde ortaya çıktığı açıklanmaktadır. Yapılan araştırmalarda, ilk oluşan borür fazının Fe_2B olduğu ancak en dış yüzeyde ise FeB_{1+x} fazının ve Fe_2B fazı üzerinde FeB fazının olduğu Mössbauer spektroskopu ile belirlenmiştir. Bor difüzyonun Fe_2B ile matris ve FeB ile Fe_2B arasında gerçekleştiği görülmektedir. Kaplama yüzeyinden iç kısımlara doğru gidildikçe Fe_2B fazının varlığı artmaktadır. Bu durum, yüzeyden belirli oranlarda tabakalar kaldırarak yapılan X - ışınları analizleri ile ispatlanmaktadır[58,60]. Amulevicius ve arkadaşlarının Fe - B sisteminde yapmış olduğu çalışmalarda, Fe_3B , Fe_2B ve FeB fazlarının varlığı lazer radyasyon tekniği ile belirlenmiştir[62,63,65].

Difüzyon esaslı büyüme mekanizması, bor kaynağından borür ve ana metal ara yüzeyine sürekli olarak yayılan bor atomlarının bor tabakasına dik doğrultuda Fe_2B kristallerini oluşturması ve bu kristallerin kolonsal bir şekilde içeriye doğru

ilerlemesiyle gerçekleşmektedir. Fe_2B fazı kuvvetli bir şekilde tercihli yönlenmeye sahip olmasına rağmen, $\text{Fe}_2\text{B}/\text{FeB}$ ara yüzeyinde düşük veya ihmal edilebilir bir kolonlaşma görülmektedir. Bu yüzden kolonların ucunda büyüme mekanizmasının daha geçerli olduğu ileri sürülmektedir. Bu mekanizmaya göre, başlangıçta oluşan Fe_2B çekirdeği, ana malzemenin bileşimine ve işlem şartlarına bağlı olarak, iğnesel bir şekilde büyüyerek bor gradyanı boyunca ilerlemektedir. Fe_2B çekirdeğinin ucu etrafında oluşan bölgesel yüksek gerilim alanları ve distorsiyonları, tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlamaktadır[62].

FeB fazının büyüme mekanizması Fe_2B fazı ile benzerlik göstermektedir. $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$ ara yüzeyindeki kolonsallık Fe_2B /matris ara yüzeyindekine nazaran daha azdır. $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$ ara yüzeyindeki kolonsallığın az olmasının nedeni, Fe_2B fazının nispeten sünek olan bir malzeme üzerinde büyüyen bir faz olması, ancak FeB fazının daha sert bir tabaka üzerinde büyümesidir. Böylece daha sert bir FeB fazı elde edilmektedir[62]. Şekil 4.6.'de borür tabakası ve matris içerisindeki bor dağılımını görmek mümkündür[62].

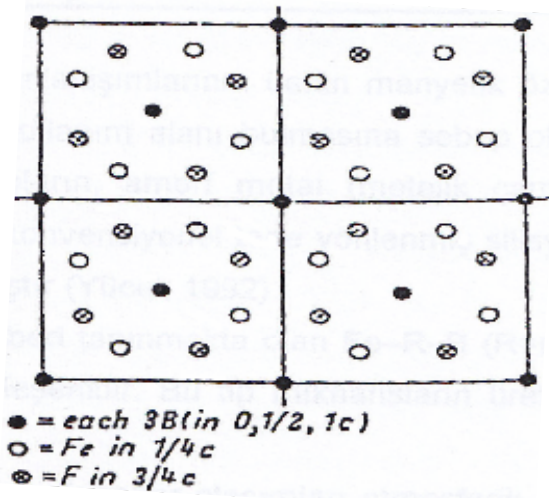


Şekil 4.6. Gaz ortamında borlama işlemine tabi tutulan bir malzemenin yüzeyinde oluşan borür tabakası ve matris içerisindeki B ve Fe dağılımı[62]

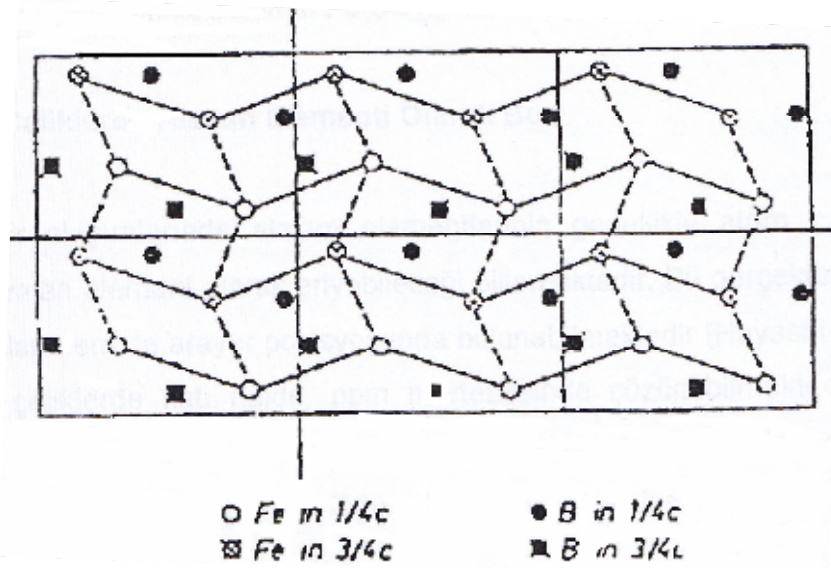
Borürlerin çoğu, kuvvetli kovalent bağ yapısına ve oldukça yüksek ergime sıcaklığı, elastik modülü ve sertlik değerlerine sahiptir. Borürlerin oluşumu, büyük ölçüde bileşik yaptığı atomla arasındaki atomik boyut faktörüne ve elektrokimyasal etkiye bağlıdır. Bir borür oluşması sırasında, dış yörünge elektronları, dağınık sp^2 ve sp^3 elektron konfigürasyonlarında yerleşebilmektedir. Bu durum, kuvvetli kovalent bağ yapısının oluşumunda önemli bir faktördür. Bağlardaki kovalentlik derecesi arttığı zaman, borürlerin ergime sıcaklığı, elastik modülü ve sertliği artırmaktadır. Çoğu metal borürler yüksek ergime sıcaklıklarına sahiptir.

Aynı şekilde tek fazlı Fe_2B tabakası çift fazlı $FeB + Fe_2B$ tabakasına göre daha üstün özelliklere sahiptir. Çift fazlı borür tabakalarında yüzeyin hemen altında porozite oluşumu mümkün olmaktadır. Bor kaplamalarda, borür tabakasının ince olması durumunda, porozite oluşumu ve tabakanın kalkma riskinin düşük olduğu düşünülmelidir. Eğer çift fazlı $Fe_2B + FeB$ borür tabakası, vakum veya tuz banyosunda $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık civarında uzun süre ısıtılma işlemine tabi tutulursa, tek fazlı Fe_2B fazı elde etmek mümkün olmaktadır. Çizelge 4.4.'de Fe_2B ve FeB fazlarının tipik özellikleri verilmektedir[36,37,39,62].

Demir borürler birçok araştırmacı tarafından incelenmiş olup, FeB 'nin ortorombik yapıya sahip olduğu, birim kafesin 4 Fe ve 4 B atomundan meydana geldiği bilinmektedir[14]. Fe_2B 'nin birim kafes tetragonal yapıya sahip olup 12 atom içerir[18]. Fe_2B kristalinin birim kafesi ve (001) düzlemindeki projeksiyonu Şekil 4.7 de görülmektedir. FeB kristalinin (001) düzlemindeki projeksiyonu Şekil 4.8.'de verilmektedir.



Şekil 4.7. Fe_2B kristalinin (001) düzlemindeki projeksiyonu[67]



Şekil. 4.8. FeB kristalinin (001) düzlemindeki projeksiyonu[68]

Çizelge 4.4. Fe₂B ve FeB fazlarının tipik özellikleri[37,38,39,62]

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Kristal Yapı	Hacim Merk. Tetragonal	Ortorombik
Latis Parametresi (Å)	a=5.078, c=4.28	a=4.053,b=5.495, c=2.946
Bor İçeriği (% Ağırlık)	8.83	16.23
Yoğunluk (gr/cm ³)	7.43	6.75
Renk	Gri	Gri
Ergime Sıcaklığı (°C)	1389 - 1410	1540 - 1657
Elektriksel Direnç (10-6 Ω.cm)	38	80
Elastik Modülü (GPa)	280 - 295	590
Mikrosertlik (GPa)	18 - 20	19 - 21
Oluşum Entalpisi(ΔH ₂₉₈)(kJ/mol)	-71.13	-71.13
Serbest Enerji(kJ/mol)(298°K)	-71.75	-69.47
Termal Genleşme Katsayısı (ppm/ °C)	7.65 (200 - 600 °C) 4.25 (100 - 800 °C)	23 (200 - 600 °C)
Termal İletkenlik (W/m. °K)	30.1(20 °C)	12.0(20 °C)

Genellikle borürlerin ısı iletkenlik katsayıları ve termal şok dirençleri oldukça yüksektir. Birçok borür, 5 - 80 μΩ-cm aralığında elektriksel dirence sahiptir ve seramikler arasında iyi elektriksel iletkenlik gösterir. Borürlerin manyetik özellikleri incelendiğinde, diamanyetik özellikten kuvvetli ferromanyetik özelliğe değiştiği fakat birçok borürün oda sıcaklığında zayıf paramanyetik özellik gösterdiği görülmektedir. Borürlerin kimyasal dirençleri, birçok seramiğe nazaran oldukça yüksektir. Borürler, kristallo-kimyasal olarak iki grupta sınıflandırılmaktadır;

- Düşük bor konsantrasyonuna sahip borürler (M_4B , M_3B , M_2B , M_3B_2 , MB ve M_3B_4 gibi., (M=metal),
- Yüksek bor konsantrasyonuna sahip borürlerin (MB_2 , MB_4 , MB_6 , MB_{12} , MB_{49} , MB_{66-100} gibi).

Düşük bor konsantrasyonuna sahip borürlerin yapıları latis parametreleriyle belirlenirken, yüksek bor konsantrasyonuna sahip borürlerin yapıları ihtiva ettikleri B-B bağ yapısındaki bor elementlerine bağlıdır[62,66].

4.9. Dökme Demirlerde Ferrobor

Dökme demirlere bor, ferrobor ilavesiyle verilir. Dökme demirlerin kompozisyonunda bulunan borun birkaç avantajı vardır. Bor, dökme demirde karbür yapıcıdır. Katılaşma esnasında teşekkül eden bu karbürler dökme demirin beyaz renkli olmasını sağlar.

Dökme demire % 0.03'e kadar bor ilave edilmesi aşınma direncini iyileştirir, % 1'e kadar çıkan oranlarda bor ilavesi, sinterlenmiş dökme demirin sinterlenme sıcaklığını büyük ölçüde düşürür. Dökme demirlere % 0.02 - 0.1 arasında bor katılması, dökme demirin yapısında grafitleşmeyi önler, yüzey sertliğini ve su alma derinliğini artırır. Temper dökme demirlere % 0.001 oranında bor ilavesi, dökme demirin tavlanması hızlandırır [70].

4.10. Amorf Metallerde Ferrobor

Ferroborun kullanım alanlarından biri de amorf metallerin üretimidir. Camsı metaller veya metalik camlar adıyla da anılan amorf metaller, kristal olmayan bir yapıya sahiptir. Amorf metal, ergimiş haldeki metalin hızlı soğutulmasıyla elde edilir. Ergimiş metal saniyede 1 Milyon Kelvinderece hızla soğutulur. Bu kadar yüksek hızda soğuyan metal katılaşırken kristalleşmeye zaman bulamaz ve metal amorf halde katılaşır. Ergimiş metali dönmekte olan soğuk bir bakır silindir üzerine sürekli akıtmak suretiyle bu hızlı soğuma elde edilir. Katılaşma sonunda teşekkül eden

amorf metal, 5 cm'ye kadar geniş ve 0.13 mm'ye kadar kalın olan bir şerit şeklindedir[2].

Amorf metaller ilk olarak 1970'li yılların sonlarında bazı amaçlar için kullanılmıştır. Elektrik transformatörlerinde kullanmaya uygun amorf metaller geliştirmek için dünyada 1980'li yıllarda araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Bu amaç için geliştirilen amorf alaşımların kimyasal kompozisyonu çok değişiktir. Fakat bunlar temel olarak bor ihtiva eden demirdir. Bu alaşımların kompozisyonunda borun atomik yüzdesi 1 - 12 arasındadır. Bor, alaşıma ferrobör ilave edilerek verilmektedir. Bu alaşımlar geliştirildiği zaman, transformatör laminasyonlarında standart malzeme olabilecekleri söylenmektedir. Eğer bu beklenti gerçekleşirse, dünya ferrobör tüketiminin büyük miktarlara ulaşacağı belirtilmektedir[69].

Transformatör nüveleri imalatında yıllardan beri kullanılan klasik manyetik çelikler çoğunlukla % 3 dolayında silisyum içeren demirdir. Tipik bir amorf metal kompozisyonu ise % 78 demir, % 13 bor ve % 9 silisyumdan ibarettir. Bor, alaşımı amorf halde katılaştırmak için gereklidir[70].

Amorf metal alaşımı yapraklarından yapılan ve elektrik nakil sisteminde kullanılan göbeklerde (çekirdeklerde) enerji kayıpları daha azdır. Amorf metal alaşımından yapılan çekirdekte kaybolan enerji, klasik silisyumlu çelik nüveli transformatörden kaybolan enerjinin dörtte biri ile üçte biri arasındadır[69].

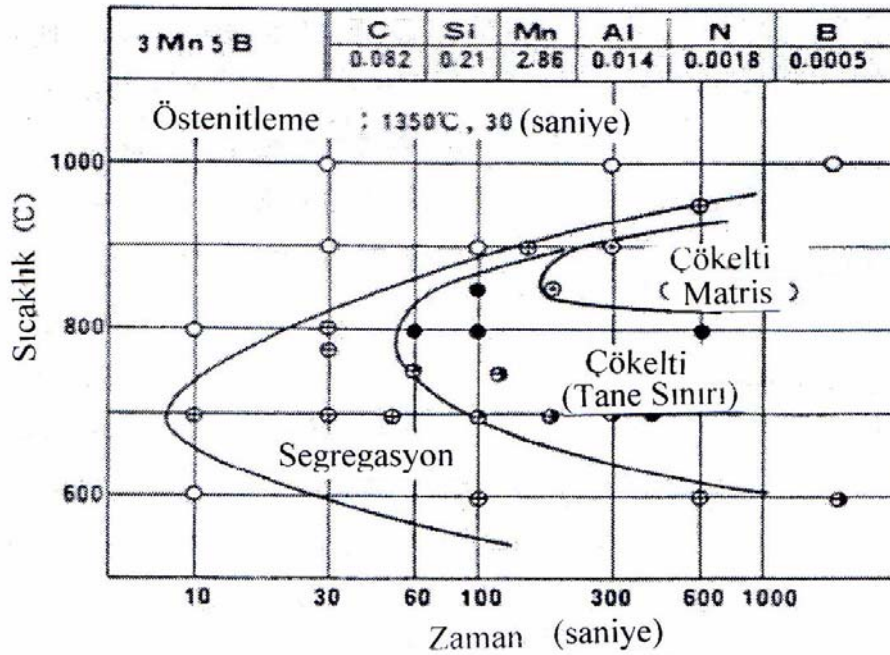
4.11. Borun Diğer Alaşım Elementleriyle Kıyaslanması

Alaşımli çeliklere % 0,001 – 0,003 arasında bor ilave edilmesi, bu çeliklerin yapısında gerek duyulan Ni, Cr ve Mo miktarlarını düşürür. 20 - 30 ppm civarında çelik içerisinde erimiş bor % 1 Ni, % 0,5 Mo, % 0,6 Mn ve % 0,7 Cr gibi sertleşebilirlik üzerine etkisi ile aynıdır. Geleneksel alaşım elementlerin her birinden (Mo, Ni, Mn, Cr, gibi) bor daha fazla ucuzdur.

4.12. Bor Elementinin Sertleşebilirliğe Etkisi

İkinci dünya harbinde Birleşik Amerika Devletlerinde ve Sovyet Sosyalist Cumhuriyetlerinde çeliklerin sertleşme özelliğini arttırmak için kullanılan yüksek değerdeki alaşım elemanlarından tasarruf edebilmek amacı ile yeni bor alaşımlı çeliklerin inkişafına çalışılmıştır,

Bor, çeliğin sertliğini karbür oluşturmak suretiyle artırır. Diğer karbür yapan elementlerle kıyaslandığında, çeliğe aynı derecede sertlik kazandırmak için çok az bor ilâvesi gerekir. Bor matris ve tane sınırlarına dağılmaktadır. Tane sınırlarındaki borun segregasyonunu engellemek istenildiğinde, 1350 °C den hızla buzlu su içerisinde soğutulması gereklidir(Şekil 4.9.).

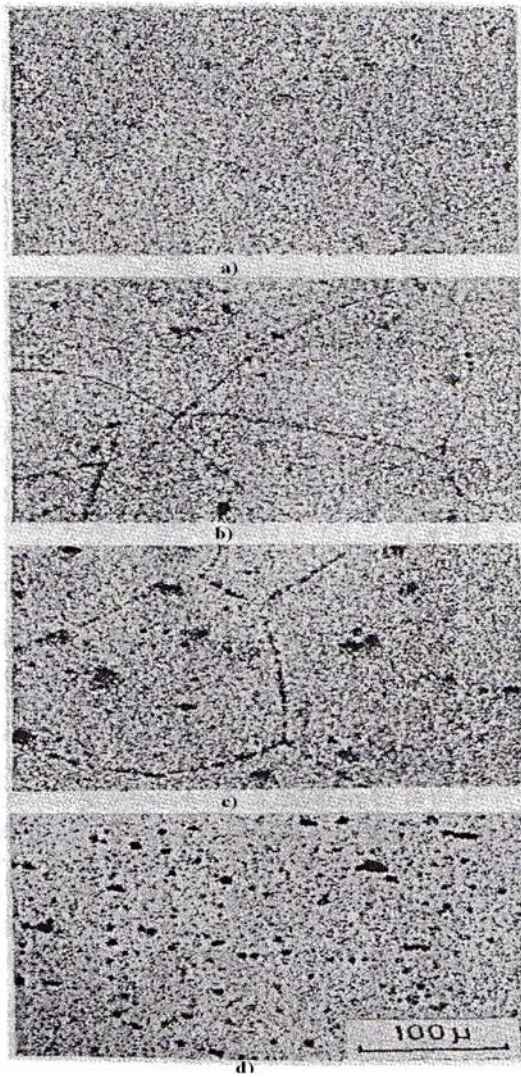


Şekil 4.9. Segregasyon ve çökelti eğrisi[8]

Bor, oluşumlarda östenit tane sınırlarındaki bor segregasyonları nedeniyle tane sınırlarında azalan arayüzey enerjisi ile çeliklerde sertleşebilirliği arttırdığı, ferrit ve

perlitin çekirdeklenmesini geciktirdiği ve böylece hızlı soğuma esnasında martenzit yapı oluşmasına imkan sağladığı ifade edilmektedir[71,72,73].

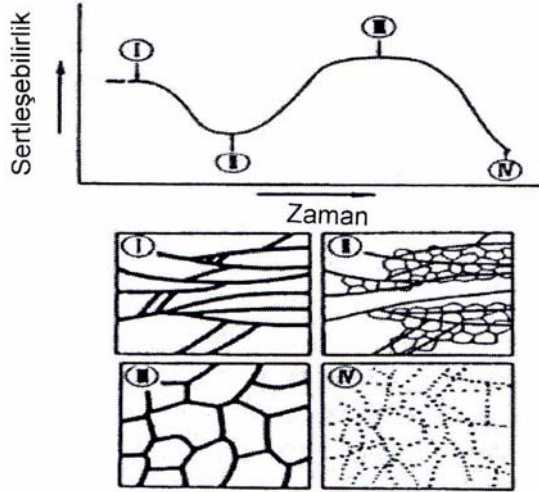
Şekil 4.10'de 3Mn5B çeliğinin dört farklı sıcaklık ve zamanda borun dağılım modeli verilmektedir. 900 °C'den daha düşük sıcaklıklarda bekletildiği zaman, bor karbür ve bor nitrürler tane sınırlarında çökelme fırsatı bulmaktadır.



Şekil 4.10. 3Mn5B çeliğinde borun dağılım modeli[42]

- a) Homojen dağılım (900 °C, 30 saniye)
- b) Tane sınırı boyunca homojen segregasyon (750 °C, 30 saniye)
- c) Tane sınırı boyunca büyük parçacık oluşumu (800 °C, 60 saniye)
- d) Matris içerisinde büyük parçacık oluşumu (900 °C, 300 saniye)

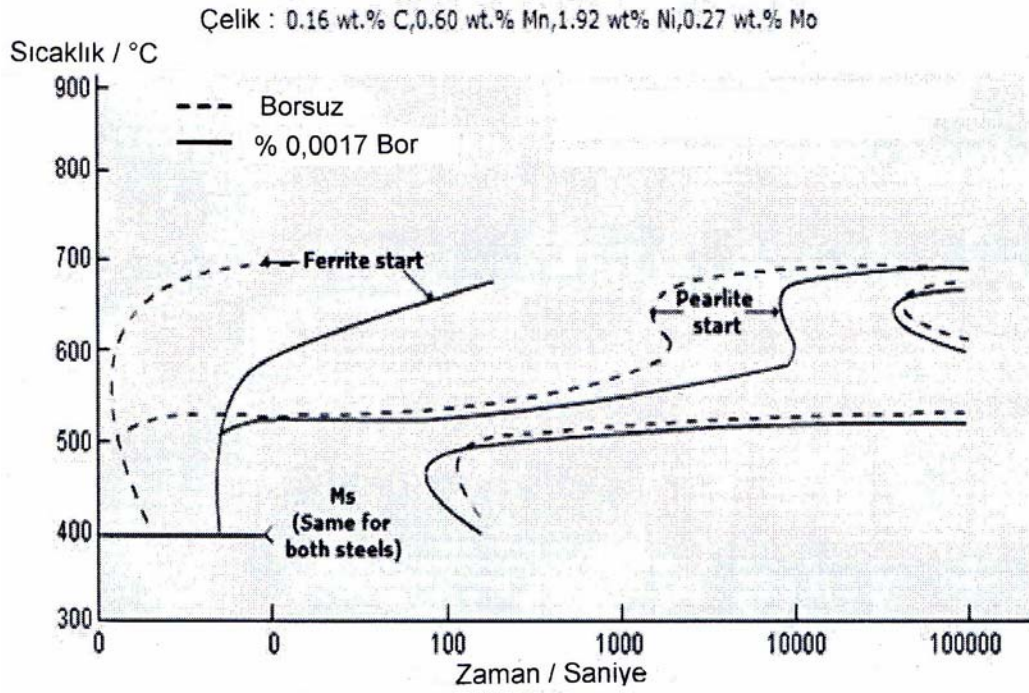
Bor hızlı soğutulduğunda (hızla su vererek) tane içinde çökelti olarak tutulduğu zaman sertleşebilirlik üzerine en büyük etkiyi sağlamış olur(Şekil 4.11.). Borun oranı 60 ppm geçtiği zaman sertlik oranı düşmektedir ve sıcak çalışma problemleri ortaya çıkmaktadır[60].



Şekil 4.11. Borun sertleşebilirliğe etkisi[27]

Bor, çelik içinde oldukça kolay oksitlenerek B_2O_3 bileşimini oluşturabilir. Ayrıca, Azot (N) ile de kolaylıkla reaksiyona girebilen bir element olduğu için, yaklaşık 900 °C’de Bor Nitrür (BN) oluşumu başlayabilir.

Borlu çelik üretiminde bor karbürler de $M_{23}(B,C)_6$ oluşmaktadır[28]. Bor karbür bileşikleri, ısıtma sırasında yaklaşık 930 °C’de çözünmeye başlar. Dolayısıyla bu sıcaklık, aynı zamanda borlu çeliklerin ısıtma işleminde tavsiye edilen en düşük östenitleme sıcaklığıdır.

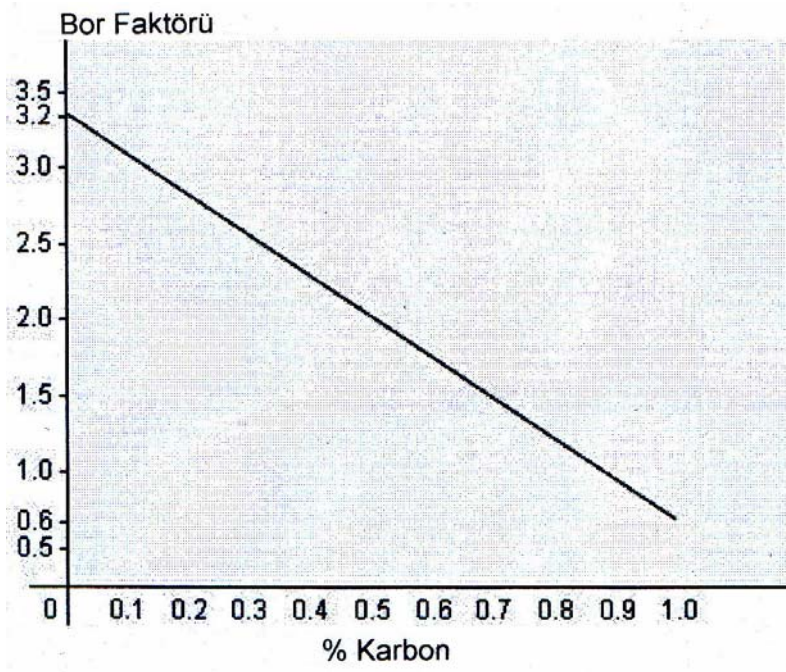


Şekil 4.12. Dönüşüm karakterleri üzerine borun etkisi[61]

20-30 ppm ilavesi ile Östenit tane sınırlarında segregasyona neden olan çökelti, tane sınırının arayüzey enerjisini azaltarak ferrit ve perlitin oluşmasını geciktirmek suretiyle sertleşebilirliği artırır(Şekil 4.12.).

Bor östenitin ferrit ve perlite dönüşme hızını keser; fakat karbon miktarı arttıkça hız kesme etkisi de azalır. Böylece çeliğin sertlik alma kabiliyetide düşer. Bu bakımdan çelikte bor elemanın ötektoit altı çeliklerde sertleştirme etkisi daha yüksektir.

Çelikte, bor elemanı östenit dönüşme hızını azaltmasına mukabil, ferrit ve ara kademe kristallerin (Beynit) büyüme hızına etkisi yoktur.



Şekil 4.13. Bor-Karbon ilişkisi[61]

Bor, düşük karbonlu çeliklerde (% 0,25 C civarı) ve aynı zamanda yaygın olarak kullanılan orta karbonlu çeliklerde (% 0,4 C civarı) çok daha fazla etkilidir. Bor ilavesi aynı zamanda düşük alaşımlı çeliklerde de etkili kullanılabilir[61]. Karbon içeriği artıkça (% 0,85 sonra) borun sertleşebilirlik üzerine etkisi sıfırdır(Şekil 4.13.).

5. BORLU ÇELİKLER

Yüzlerce farklı kullanım alanına sahip olan bor ve bor 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[74].

Birkaç yüz çeşit borlu çelik mevcuttur. Borlu çeliklerin çoğu Mn ve Cr ile alaşımlandırılmıştır. Bazı hallerde Ni ve Mo içerirler. Karbon oranları, % 0,15 ile % 0,45 arasında değişir. Borlu çelikler sertleştirilmiş, temperlenmiş ve bazı hallerde yüzey sertleştirilmiş koşullarda kullanılırlar. Toplam bor içeriği, çözülmeyen bor bileşikleri de dahil olmak üzere % 0,006 değerini geçmemelidir. Borlu çelikler başlıca Alüminyum ile deokside edilirler. Deoksidasyon sonucu yapıda % 0,03 oranında Alüminyum kalır. Borlu çeliklere, genellikle (% 0,03 Ti'lu), nitrürosyon işlemi de uygulanır[74,75,76].

5.1. Borlu Çeliklerin Mekanik ve İşlenebilme Özellikleri

Makina imalat sanayide kullanılan malzemeler çekme mukavemeti, akma sınırı, yüzey sertliği, çentik darbe mukavemeti gibi mekanik özelliklerin yanında kaynak edilebilme kabiliyeti, sertleşme kabiliyeti ve şekil değiştirme kabiliyeti gibi malzemenin işlenebilme özellikleri de ilgilendirir. Yani, bir malzemenin mekanik özellikleri kadar kolay işlenebilme özellikleri de önemlidir.

Borlu çelikler, ısıl işlem öncesi nispeten düşük mekanik özelliklere sahiptirler. Yani, sıcak hadde ürünü yassı levha halinde satın alınan borlu 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 kullanılabilmektedir. 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 beyaz çeliklere yapılan bakır-bor katkısı ile üretilen çeliklerin gemi, köprü ve petrol platformlarının yapımında kullanılıyor olması korozyon direncinin yüksekliğinin bir göstergesidir[76].

5.2. Borlu Çeliklerin Kullanım Alanları

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 alaşımlı çeliklerdir. Kolay işlenebilir olmaları ve uygulanan ısı işlemler sonrasında da çok iyi mekanik özellikler sergilemeleri bu tip çeliklerin en önemli özelliklerindendir. Benzer kabiliyetleri sunan yüksek alaşımlı çeliklere göre ucuz olmaları da dikkate alınırsa, borlu çeliklerin gittikçe zorlaşan ekonomik koşullarda makina 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 makinalarının iş gören kısımlarında, tank paletlerinde, kepçelerin tırnaklarında ve benzeri aşınma dayanımı

gerektiren iş parçalarının yapımında yine borlu çeliklerin kullanıldığı görülmektedir[74,75,76]. Türkiye’de son zamanlarda vida yapımında da kullanılmaktadır.

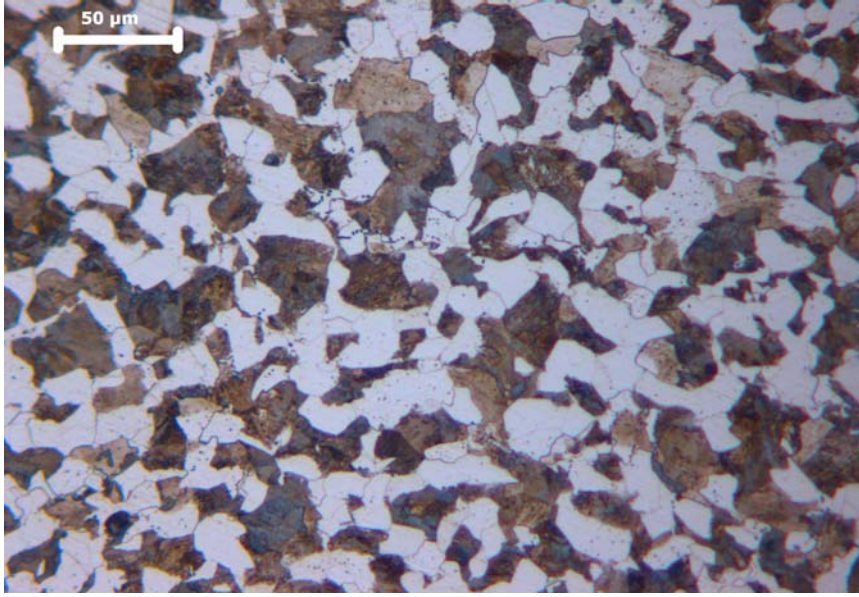
5.3. Türkiye’de Üretilen Borlu Çeliklerin Kimyasal Analizleri ve Mikroyapılarının Karşılaştırılması

Türkiye’de borlu çelik üretimi ASİL Çelik A.Ş. tarafından 2000 yıllarda tam olarak başlanmıştır. Üretilen borlu çelikler otomotiv sanayinde ve makine parçalarında kullanılmaktadır. Borun sertleşebilme özelliğinden yararlanılmaktadır.

Resim 5.1., 5.2., 5.3. ve 5.4.’de Bursa Asil Çelik A.Ş. firmasından temin edilen 20MnCrS5 ile 20MnCrB5 borlu çeliklerin değişik büyütmelerde optik mikroskopla çekilmiş mikroyapı fotoğrafları verilmektedir. Çizelge 5.1. ve Çizelge 5.2.’de 20MnCrS5 ile 20MnCrB5 borlu çeliklerin kimyasal analizleri verilmektedir.

Çizelge 5.1. 20MnCrS5 malzemesinin kimyasal analizi

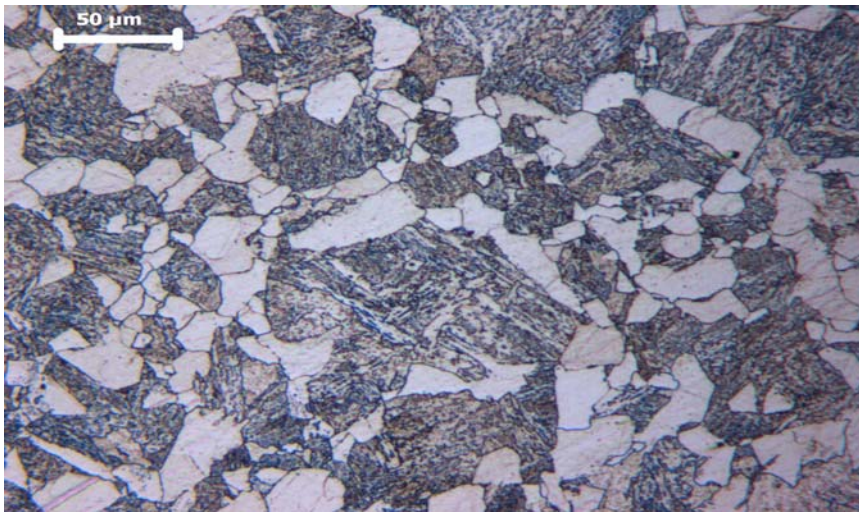
Numune	% C	% Mn	% P	% S	% Cr	% Cu	% Al	% Ti	% B
20MnCrS5	0,21	1,26	0,010	0,032	1,18	0,13	0,024	0,016	-



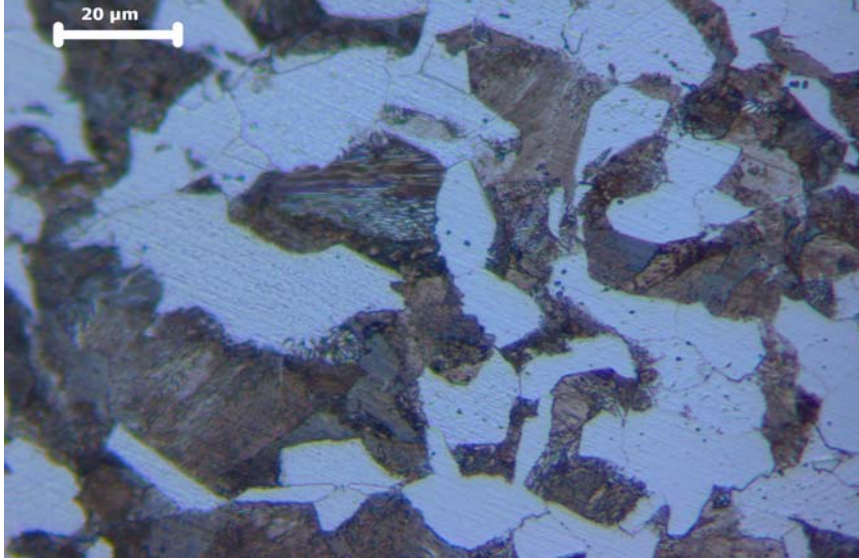
Resim 5.1. 20MnCrS5 malzemesinin mikroyapı fotoğrafı

Çizelge 5.2. 20MnCr5 + Bor malzemesinin kimyasal analizi

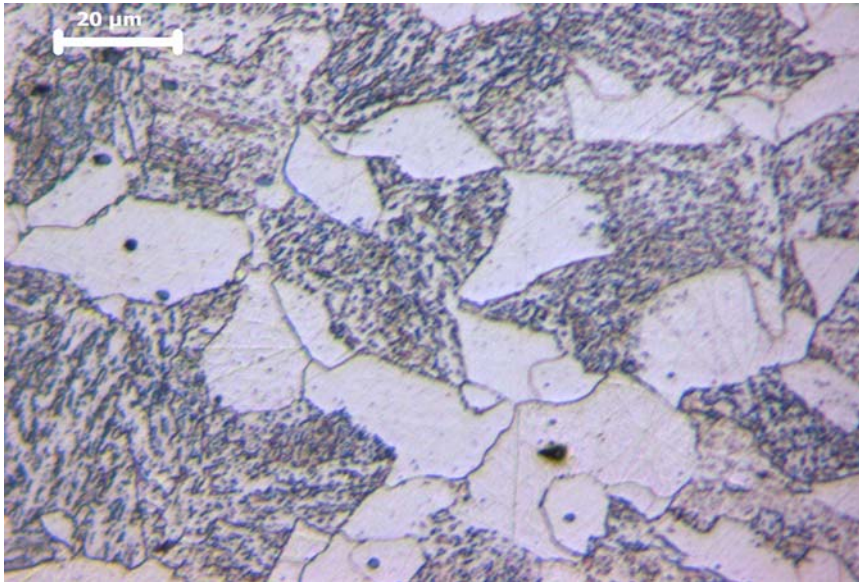
Numune	% C	% Mn	% P	% S	% Cr	% Cu	% Al	% Ti	% B
20MnCrS5	0,21	1,26	0,010	0,032	0,11	0,13	0,024	0,016	0,0019



Resim 5.2. 20MnCrS5 + Bor malzemesinin mikroyapı fotoğrafı



Resim 5.3. 20MnCrS5 malzemesinin mikroyapı fotoğrafı



Resim 5.4. 20MnCrS5+Bor malzemesinin mikroyapı fotoğrafı

Asil Çelik A.Ş. tarafından üretilen ve Resim 5.2. ve 5.4.'de mikroyapı fotoğrafları verilen 20MnCrS5 + Bor malzemesi 1600 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda 75 tonluk vakumlu indüksiyon ocağında ergitildikten sonra 1200 °C sıcaklıkta borlu çeliğe

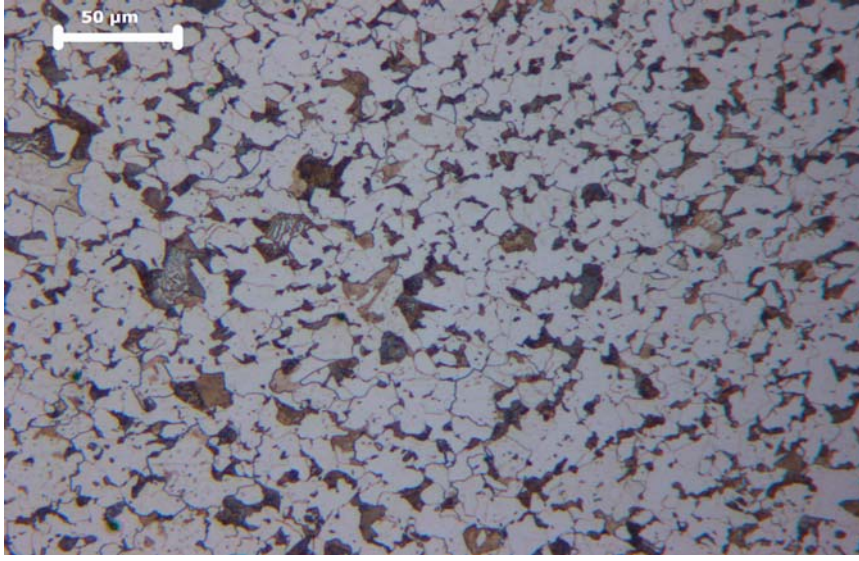
haddeleme işlemi yapılmış ve havada soğutulmuştur. Resim 5.1. ve 5.3.'de 20MnCrS5 malzemesinin mikroyapı fotoğrafları verilmektedir. 20MnCrS5 malzemesine aynı işlem süreci uygulanmıştır. 20MnCrS5 + Bor malzemede tanelerde perlitin ferrite göre daha yoğun olduğu görülmektedir. Borlu ve borsuz numunelerin taneler arasında belirgin bir büyüklük farkı gözlenmemiştir.

İzmir Ege Çelik A.Ş. borlu çelik imalatına 2005 yılı itibari ile başlanmış ve üretilen borlu çeliklerin sertleşebilme özelliğinden yararlanmak suretiyle genelde cıvata sanayisinde kullanılmak için tel ve çubuk olarak üretimleri gerçekleştirilmektedir. Üretilen tel ve çubuk halinde borlu çelikler kangal halinde hazırlanarak özellikle cıvata yapımında kullanılmaktadır.

Resim 5.5., 5.6., 5.7. ve 5.8.'da İzmir Ege Çelik'ten alınan 20MnB4 ile 20Mn4 malzemelerinin değişik büyütmelerde optik mikroskopla çekilmiş mikroyapı fotoğrafları verilmektedir. Çizelge 5.3 ve 5.4.'de 20MnB4 ile 20Mn4 malzemelerin kimyasal analizleri verilmiştir.

Çizelge 5.3. 20MnB4 malzemesinin kimyasal analizi

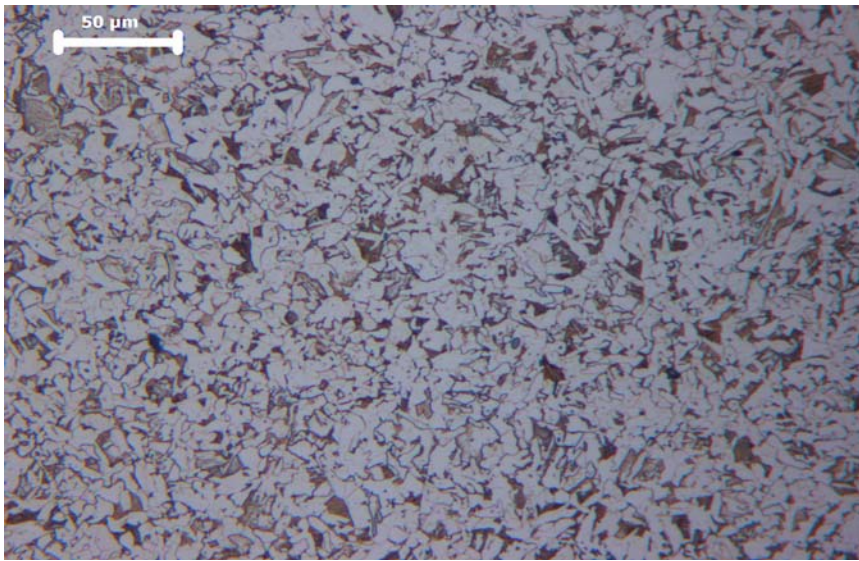
Numune	% C	% Mn	% P	% S	% Cu	% Al	% Ti	% B
20MnB4	0,21	0,94	0,006	0,004	0,06	0,028	0,045	40ppm



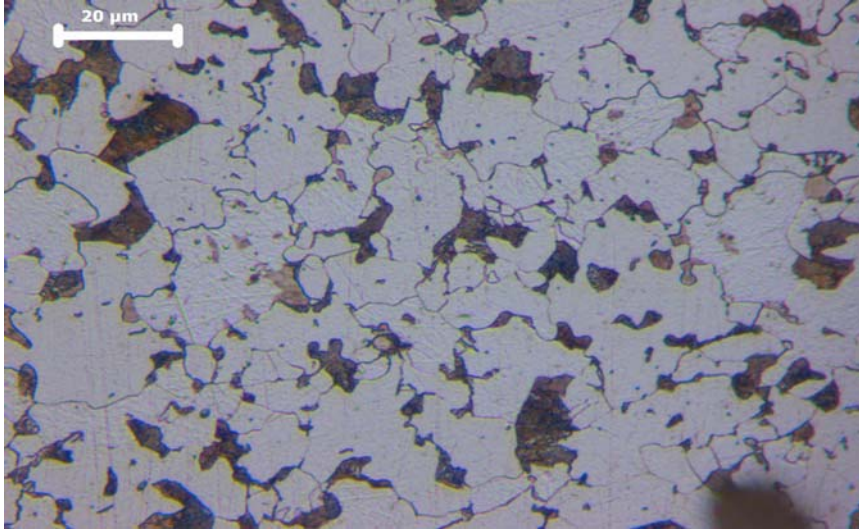
Resim 5.5. 20MnB4 malzemesinin mikroyapı fotoğrafı

Çizelge 5.4. 20 Mn4 malzemesinin kimyasal analizi

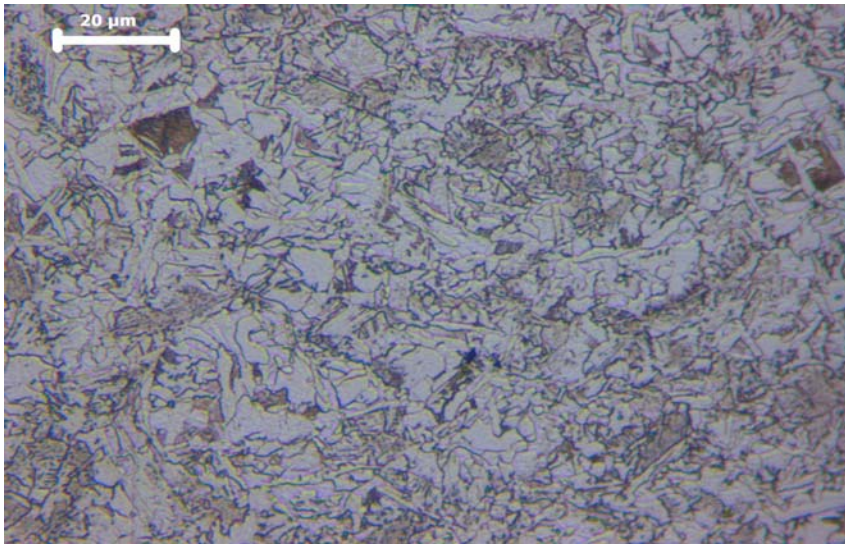
Numune	% C	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Cu	% B
20Mn4	0,20	0,84	0,019	0,020	0,03	0,008	0,026	-



Resim 5.6. 20Mn4 malzemesinin mikroyapı fotoğrafı



Resim 5.7. 20MnB4 malzemesinin mikroyapı fotoğrafı



Resim 5.8. 20Mn4 malzemesinin mikroyapı fotoğrafı

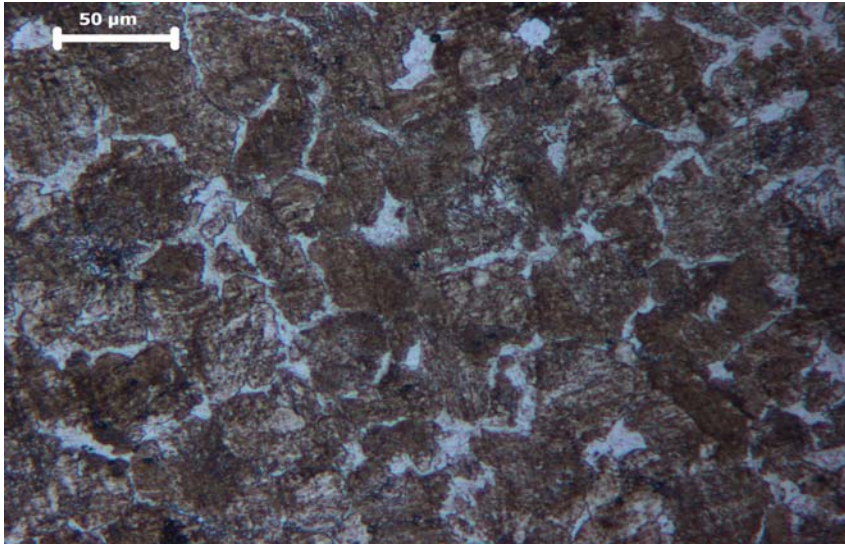
Resim 5.5. ve 5.7.'de mikroyapısı verilen 20MnB4 malzemesi, 1600 °C sıcaklıkta ergitildikten sonra 1100 – 1150 °C sıcaklıklarda haddeleme işlemi yapılmış ve 900 °C ye kadar su ile soğutulduktan sonra havada soğutulmuştur. Resim 5.6. ve 5.8.'de mikroyapı fotoğrafları verilen 20Mn4 malzemesi 900 - 1000 °C sıcaklıkta haddeleme işlemi yapılmış ve suda soğutulmuştur. 20Mn4 malzemesinin ferrit ve perlit oluşmuş bölgesinden alınmış mikroyapı fotoğraflarındaki tane boyutu, 20MnB4 malzemesinin

tane yapısına göre küçük olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin ise 600 °C kadar yapılan suda soğutma işlemidir.

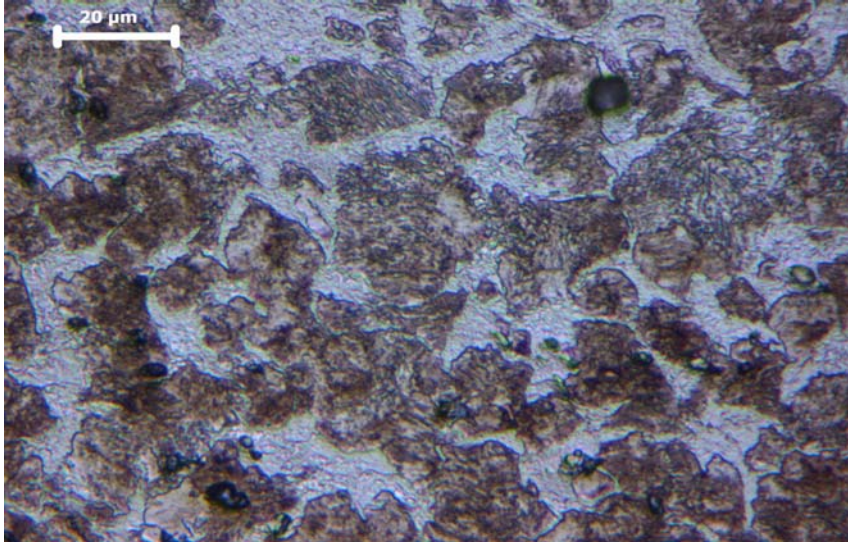
Resim 5.9. ve 5.10’da Bursa Çemtaş firmasından alınan SAE 15B41H malzemesinin değişik büyütmelerde optik mikroskopla çekilmiş mikroyapı fotoğrafları verilmektedir. Çizelge 5.5.’de ise SAE 15B41H malzemesinin kimyasal analizi görülmektedir. SAE 15B41H malzemesinin bor içermeyen SAE 1541H malzeme temin edilememiştir.

Çizelge 5.5. SAE 15B41H malzemesinin kimyasal analizi

Numune	% C	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Cu	% Al	% Ti	% B
20MnCrS5	0,41	1,40	0,010	0,015	0,68	0,15	0,17	0,026	0,035	13ppm



Resim 5.9. SAE 15B41H malzemesinin mikroyapı fotoğrafı



Resim 5.10. SAE 15B41H malzemesinin mikroyapı fotoğrafı

Resim 5.9. ve 5.10.'da mikroyapısı verilen SAE 15B41H malzemesi, 25 tonluk vakumlu indüksiyon ocağında 1620 °C sıcaklıkta ergiterek bor ilave edilmiş ve 1150 °C sıcaklıkta haddelenmiştir. Haddelenme sonrası SAE 15B41H malzemesinde benzer bileşimdeki diğer malzemelerde görülen yeniden kristalleşmiş taneler görülmektedir. Tane sınırlarında ferritin oluştuğu fakat sınırlarının belirgenleşmediği görülmektedir. SAE 15B41H malzemesinde yapılan kimyasal analiz sonucu 13 ppm bor olduğu gözlenmiştir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

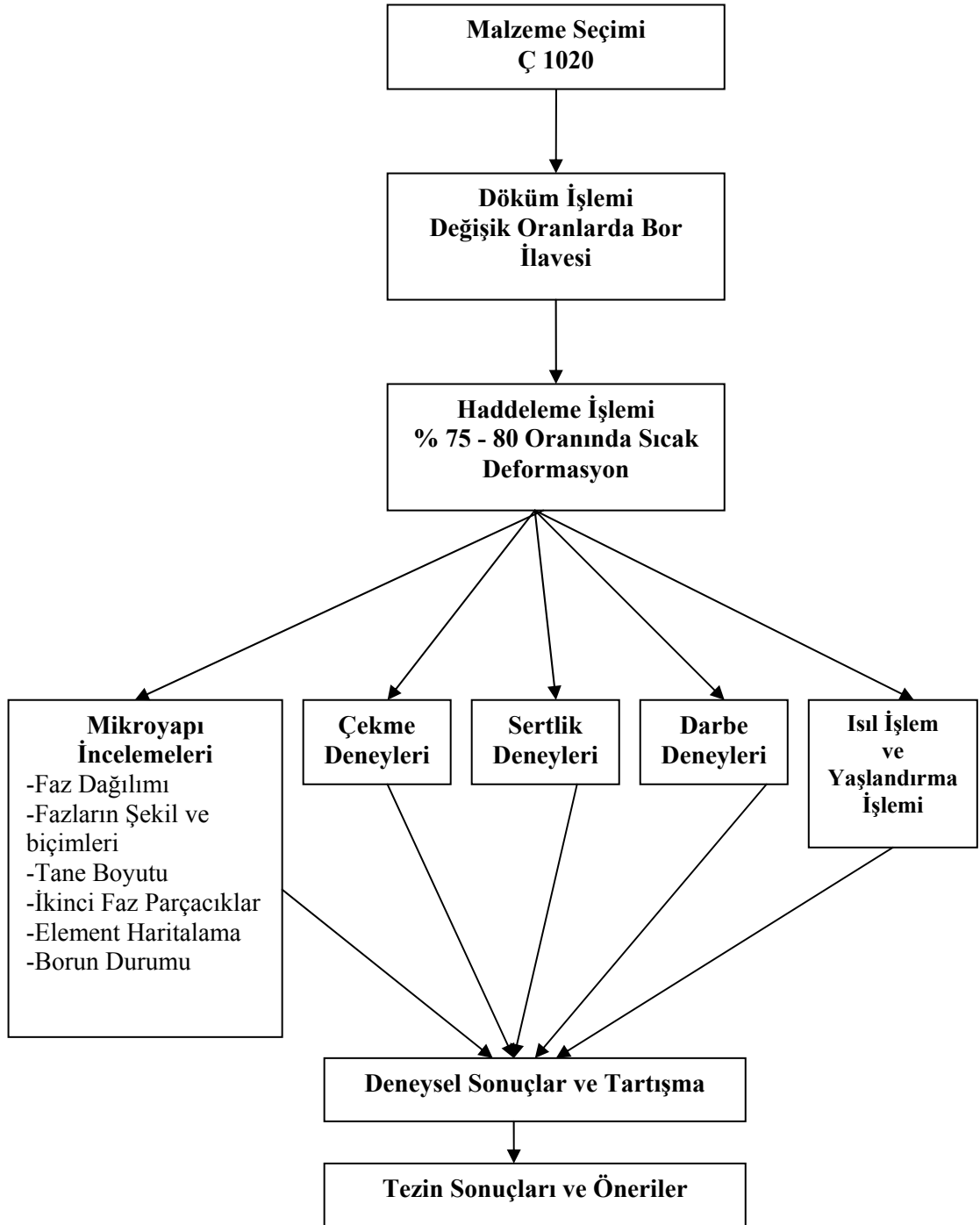
6.1. Malzeme ve Deneysel Çalışma Sistematığı

Deneysel çalışmalar için ülkemizde en çok kullanılan düşük karbonlu çelik türü olması nedeni ile Ç1020 çeliği tercih edilmiştir. Ç1020 çeliği genel olarak cıvata, somun, makine gövde ve parçalarında, tank paletlerinde, mermi kovanlarında kullanılmasının yanı sıra özellikle inşaat işlerinde Tem-Kor yönteminin geliştirilmesi ile kullanılan Ç1020, kaynak işlemlerinde genel olarak kaynaklanabilirliği nisbeten az olan orta karbonlu çeliklerden Ç1040'ın yerini almıştır.

Karabük Saka Demir Çelik A.Ş.'den 60 mm çapında ve 6 metre boyunda Ç1020 çeliği temin edilmiştir. Saka Demir Çelik A.Ş tarafından verilen Ç1020 çeliğinin kimyasal analizi Çizelge 6.1.'de belirtilmiştir.

Çizelge 6.1. Saka Demir Çelik A.Ş. tarafından verilen numunenin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Numune Çapı (mm)	Malzeme Standartı	% C	% Mn	% Si	% S	% P	% Cu
60	St 44-2 (Ç1020)	0.22	0.84	0.21	0.04	0.021	0.049

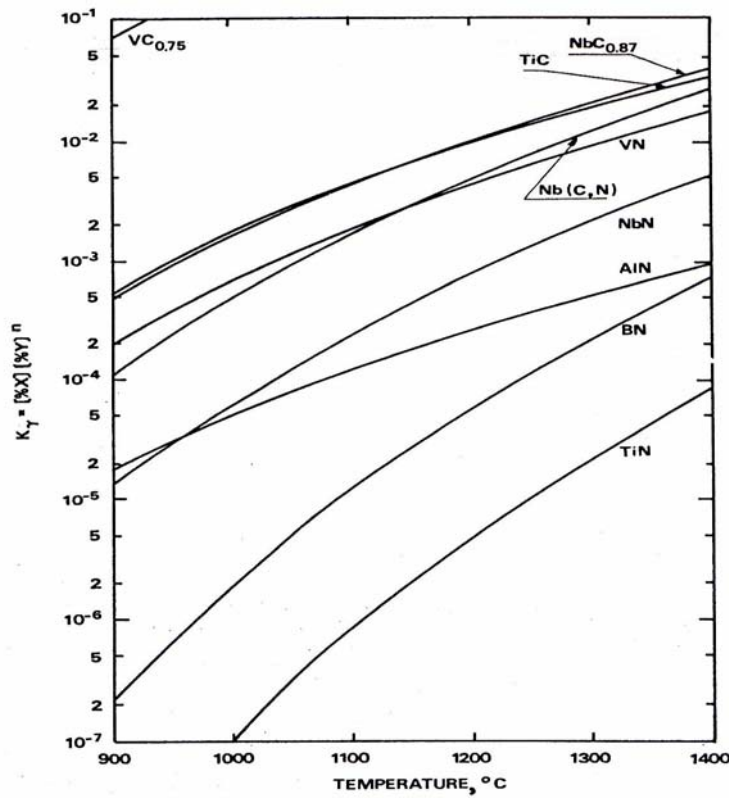


Şekil 6.1. Deneysel çalışma sistematığının şematik gösterimi.

Tez süresince yapılan (deneysel) çalışmaların sıra akışı Şekil 6.1.'de verilmektedir.

6.2. Döküm İşlemi Sonrası Arzu Edilen Kimyasal Analiz Sonuçları

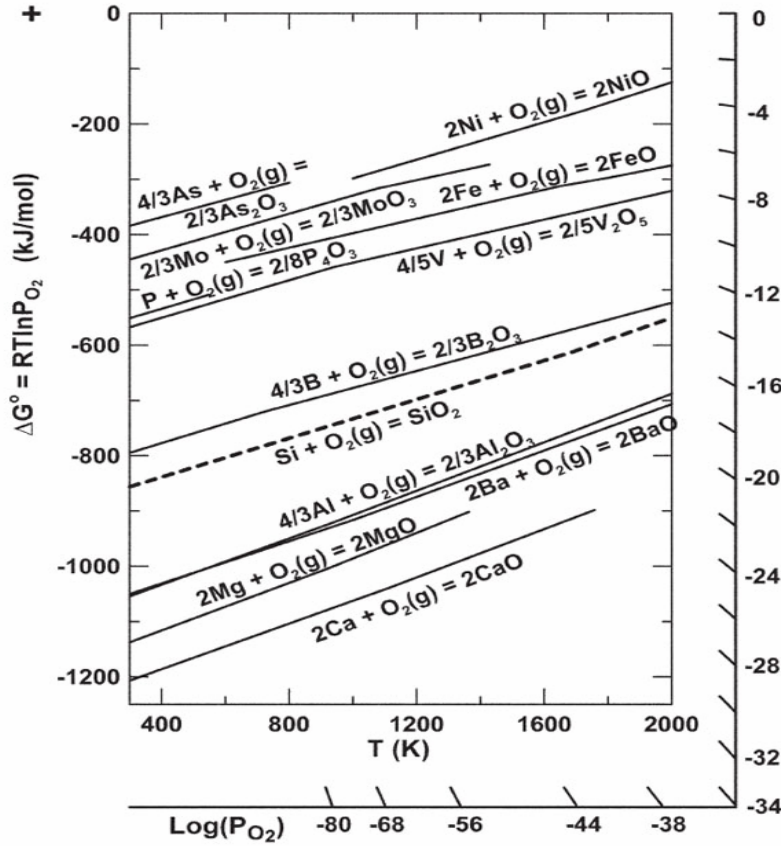
Döküm işlemi sonucunda 0 (borsuz), 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 ve 45 ppm oranlarında bor Ç1020 çeliğine ilave edilerek optimum bor oranının belirlenmesi, borun oksijen ve azota karşı ilgisinin yüksek olması nedeniyle, Ç1020 çeliğine 400 ppm Alüminyum ve Titanyum ilave edilmesi düşünülmüştür. Şekil 6.2. den borun azot ile BN oluşturmada önce azota karşı ilgisinin daha fazla olduğu titanyum ile TiN bileşiği oluşturduğu Ellingham diyağramında görülmektedir. Bundan dolayı bor ilavesi öncesi titanyum ilave edilerek borun azot ile birleşerek BN oluşumunun önlenmesi ve borun elementel olarak Ç1020 çeliğinin içerisinde kalması düşünülmüştür.



Şekil 6.2. Bor nitrür ve titanyum nitrürün oluşum önceliğine göre Ellingham diyağramı.

Şekil 6.3. de borun oksijenle bileşik B_2O_3 (ΔG° Serbest Enerjisi -600 kJ/mol olan) oluşturmada önce oksijenin bora göre ilgisinin daha yüksek olduğu alüminyum ile bileşik Al_2O_3 (ΔG° Serbest Enerjisi -850 kJ/mol olan) oluşturduğu Ellingham

diyağramında görülmektedir. Bundan dolayı boru oksijenden korumak için bor ilavesi öncesi alüminyum ilave ederek boru Ç1020 çeliği içerisinde elementel seviyede kalması düşünülmüştür.



Şekil 6.3. Alüminyum, silisyum, kalsiyum ve borun oksitle bileşik oluşturma önceliğine göre Ellingham diyağramı

Llewellyn ve arkadaşları[8], SAE 8600 çeliğine vakumlu indüksiyon ocağında ilave ettikleri boru oksijenden korumak için 300 ppm alüminyum ve boru azottan korumak için ise 300 ppm titanyum ilave etmişlerdir. Taylor ve arkadaşları[11] ise, vakumlu indüksiyon ocağında boru oksijen ve azottan korumak için 340 ppm alüminyum ile 400 ppm titanyum ilave etmişlerdir.

Alüminyum ve titanyum borsuz Ç1020 çeliğine de ilave edilerek optimum bor oranının belirlenmesini kolaylaştırmıştır. Dökümü yapılacak borlu çelik içerisindeki boru korumak için ilave edilecek alüminyum, malzeme içerisindeki oksijenden ve döküm işlemi sırasında havadan ergiyik içerisinde karışabilecek oksijenden korunması

ve titanyum ilave edilerek ise malzeme içerisindeki azottan ve döküm işlemi sırasında havadan ergiyik içerisinde ilave olabilecek azottan borun korunması için 400 ppm ilave düşünülmüştür. Döküm işlemi sonrası arzu edilen kimyasal analiz sonuçları Çizelge 6.2.'de verilmektedir.

Çizelge 6.2. Döküm işlemi sonrası arzu edilen kimyasal analizler

Nu.	C	Mn	Si	P	S	Al (ppm)	Ti (ppm)	B (ppm)
1	0,18 0,23	0,30 0,60	0,10 0,35	≤0,04	≤0,04	400	400	≤ 3 ppm
2	0,18 0,23	0,30 0,60	0,10 0,35	≤0,04	≤0,04	400	400	10
3	0,18 0,23	0,30 0,60	0,10 0,35	≤0,04	≤0,04	400	400	15
4	0,18 0,23	0,30 0,60	0,10 0,35	≤0,04	≤0,04	400	400	20
5	0,18 0,23	0,30 0,60	0,10 0,35	≤0,04	≤0,04	400	400	25
6	0,18 0,23	0,30 0,60	0,10 0,35	≤0,04	≤0,04	400	400	30
7	0,18 0,23	0,30 0,60	0,10 0,35	≤0,04	≤0,04	400	400	35

6.3. Ç1020 Malzemesinin Döküm İşlemine Hazırlık Aşaması

Sıvı ergiyik metal içerisine atılan nemli bir şarj malzemesi, personel ve teçhizat üzerine metal sıçramasına neden olmaktadır. Bundan dolayı döküm işleminden önce indüksiyon şarj malzemesinin mümkün olduğu kadar kuru olmasına dikkat edilmiştir. Buna ilaveten, şarj ile ilave edilen nem, metalin hidrojen kapmasına neden olmaktadır. Hidrojen kapması neticesinde ise metalürjik problemler ortaya çıkmaktadır. Aynı durum yağlar içinde geçerli olması nedeniyle Ç1020 çeliğinin

yüzeyi tornada işlenerek parlatılan numune yüzeyine, şarj işlemine kadar çalışma esnasında yağ bulaştırılmamasına dikkat edilmiştir.

Ş.Koçhisar Ülger Makine A.Ş.'de tornada Ç1020 (St 44-2) çeliğinin yüzeyi talaş kaldırmak suretiyle yüzeyindeki yağlar alınmıştır. Vakumsuz indüksiyon ocağımızın kapasitesi 35 kg ve pota çapının 165 mm olması nedeniyle 200 mm boyunda ve 55 mm çapında numuneler hazırlanmıştır.

Ç1020 malzemesinin yanı sıra % 18.2 ferrobor malzeme, % 99.9 saf alüminyum ve % 99.5 saf titanyum temin edilerek döküm işleminde kullanılmak üzere hazırlanmış ve gerekli hesaplamalar yapılarak değişik miktarlarda bor, alüminyum ve titanyum hazır hale getirilmiştir.

Sıvı çeliğin döküleceği seramik kalıplar, döküm işlemi öncesi 450 °C'ye kadar fırında ısıtılmış ve sıvı çeliğin olabildiğince homojene yakın bir çekirdekleşme oluşması amaçlanmıştır. Seramik kalıplarda çatlama ve kırılma olmaması için kalıbın yüzey ve köşe kısımları seramik hamuru sürülerek takviye edilmiştir.

6.4. Ç1020 Malzemesinin Kimyasal Analizi

Saka Demir Çelik A.Ş. tarafından verilen kimyasal analizin içerisindeki bor, alüminyum ve titanyum oranlarını tam olarak tespit etmek ve ilave edilmesi gereken bor, alüminyum ve titanyum miktarlarını hesaplamalarının doğru yapılabilmesi için ana malzemenin kimyasal analizi tespit edilmiştir. TÜBİTAK MAM tarafından Ç1020 çeliğinin farklı bölgelerinden yapılan kimyasal analizlerin ortalama sonuçları Çizelge 6.3.'de verilmektedir.

Çizelge 6.3. Ç1020 çeliğinin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
Ç1020	0.193	0.785	0.146	0.0314	0.061	0.0015	<0.0010	0.0006	<0.0010

Ç1020 malzemesinin Çizelge 6.3’de belirtilen kimyasal analiz sonuçlarında 15 ppm alüminyum, 10 ppm titanyum ve 6 ppm de bor görülmektedir. Ç1020 malzemesine ilave edilecek titanyum, alüminyum ve bor miktarlarına Ç1020 malzemesinde mevcut oranlar da dahil edilmiştir.

6. 5. Birinci Döküm İşlemi

Ankara/Furkan Mühendislik A.Ş.’de birinci döküm işleminde 35.197 kg Ç1020 çeliği indüksiyon ocağına şarj edilmiştir. Şarj malzemesinin ergimesi yaklaşık 1 saati bulmuştur. Ç1020 malzemesi 1630 °C’de ergime işlemi gerçekleştikten sonra sıvı malzeme üzerine perlit tozu atılarak yüzeydeki cürufkların ince bir katman oluşturması sağlanmış ve ergiyin hava ile teması kesilmiştir. Perlit tozu tarafından oluşturulan katman alüminyum, titanyum ve son olarak da bor ilave edileceği zaman ergiyeğin üzerinden soğuk metal çubuk ile alınmıştır.

35,197 gr Ç1020 şarj malzemesi için indüksiyon ocağının vakumsuz olması ve atmosfere açık olması nedeniyle 400 ppm ilave edilmesi düşünülen alüminyum ve titanyum 600 ppm olarak ilave edilmiştir. Literatürde vakumlu indüksiyon ocağında 300 – 400 ppm alüminyum ve titanyum ilave edilmektedir. Daha öncesinde vakumlu indüksiyon ocağı ile yapılan döküm işlemlerinde alüminyum ve titanyumun kimyasal analizler sonucu olması gerekenden daha az çıkması nedeniyle, 600 ppm alüminyum için 14 gr katılması gereken alüminyum 1630 °C de yanma olasılığı düşünülerek 56 gr (4 kat) olarak ilave edilmiştir. Titanyumda ise, alüminyuma göre 1630 °C de yanma olasılığı daha az olduğu için 600 ppm için 14 gr titanyum ilave edilmesi gerekirken 35 gr (2,5 kat) olarak ilave edilmiştir. Önce alüminyum ilave edilmiş daha

sonra ise titanyum ilave edilmiştir. Bu ilavelerden sonra ergiyik içerisinde numune alınarak kimyasal analizi yapılmıştır. Birinci dökümlerin kimyasal analizlerin tamamı Ankara/Furkan Mühendislik A.Ş.'de ve Gebze TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü'nde yapılmıştır. Alüminyum ve titanyum ilavesinden sonra sıvı içerisinde alınan numunenin kimyasal analizi Çizelge 6.4.'de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Alüminyum ve titanyum ilavesinden sonra ergiyik içerisinde alınan numunenin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
Ç1020	0.159	0.432	0.091	0.020	0.025	0.066	0.064	0.0005	0.0007

Çizelge 6.4.'de verilen kimyasal analiz sonuçlarında elde edilen 660 ppm alüminyum ve 640 ppm titanyum iyi bir sonuç teşkil etmektedir. Fakat % 0,15 - 0,30 arasında olması gereken ve Ç1020 çeliğinde % 0.21 değerinde bulunan silisyumun yanması veya oksitle birleşerek ($\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$) cürufa karışması sonucu, % 0,091'e düştüğü görülmektedir. Gaz boşluklarını engelleyen silisyumun % 0,15 - 0,30 arasında olması için % 70'lik ferro silisyumdan 85 gr ilave edilerek % 0.25'e silisyum oranının çıkması hedeflenmiştir. Çizelge 6.5.'de silisyum ilavesi sonucu oluşan kimyasal analiz verilmiştir.

Tablo 6.5. Alüminyum, titanyum ve silisyum ilave edildikten sonra 2 adet dökülen numunenin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Döküm No	Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
1.-1	Ç1020	0.163	0.484	0.249	0.017	0.020	0.013	0.041	<0.0001	0.0092
1.-2	Ç1020	0.153	0.484	0.250	0.017	0.020	0.010	0.043	<0.0001	0.0087

Alüminyum, titanyum ve silisyum ilave edildikten sonra sıvı Ç1020 çeliği, besleyicisi bulunan ve 450 °C'ye kadar ısıtılan 30x30 kalınlığındaki kare seramik kalıba 2 adet döküm gerçekleştirilmiştir. Bor kaybı yaklaşık yarı yarıya olması nedeniyle bor kayıpları önlemek ve değişik oranlarda borlu numune elde etmek için her döküm öncesi ferrobör ilavesi yapılmıştır. Ferrobör ilaveleri sonrasında zaman kaybetmeksizin döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. 15 ppm bor için 1,16 gr ferrobör ilave edilmiş ve 2 adet döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.6.'da döküm sonucu oluşan kimyasal analiz verilmiştir.

Çizelge 6.6. 15 ppm oranında bor oluşturan 1,16 gr ferrobör ilavesi sonrası 2 adet dökülen Ç1020 çeliğinin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Döküm No	Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
2.-1	Ç1020	0.152	0.485	0.254	0.016	0.018	0.010	0.041	0.0007	0.0091
2.-2	Ç1020	0.167	0.479	0.245	0.016	0.020	0.022	0.038	0.0006	0.0196

Mevcut ergiye 15 ppm oranında bor oluşturan 1,16 gr ferrobör ilave edilmiş ve 2 döküm daha yapılmıştır. Kimyasal analiz sonucunda 6 ila 7 ppm bor elde edilmiştir.

Çizelge 6.7. Mevcut ergiye 15 ppm oranında bor için 1,16 gr ferrobör ilavesi sonrası 2 adet dökülen Ç1020 çeliğinin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Döküm No	Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
3.-1	Ç1020	0.148	0.482	0.247	0.017	0.020	0.006	0.036	0.0015	0.0107
3.-2	Ç1020	0.150	0.473	0.247	0.016	0.019	0.004	0.035	0.0015	0.0116

Çizelge 6.7.'de döküm sonrası oluşan kimyasal analiz verilmiştir. Mevcut ergiye 20 ppm oranında bor oluşturan 1,54 gr ferrobör ilave edilerek 2 adet döküm yapılmıştır. Döküm sonrası 15 ppm bor elde edilmiştir.

Çizelge 6.8.'de döküm sonrası oluşan kimyasal analiz verilmiştir. Kimyasal analiz sonucu 26 ve 29 ppm bor elde edilmiştir.

Çizelge 6.8. 20 ppm oranında bor oluşturan 1,54 gr ferrobör ilavesi sonrası 2 adet dökülen Ç1020 çeliğinin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Döküm No	Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
4.-1	Ç1020	0.156	0.458	0.238	0.017	0.020	0.002	0.024	0.0026	0.0115
4.-2	Ç1020	0.145	0.451	0.232	0.015	0.017	<0.0001	0.035	0.0029	0.0129

Potada kalan mevcut sıvıya 20 ppm oranında bor oluşturan 1,54 gr ferrobör tekrar ilave edilerek 1 adet döküm yapılmış vakumsuz indüksiyon ocağı ile yapılan ilk döküm işlemi tamamlanmıştır. Çizelge 6.9.'da döküm sonrası oluşan kimyasal analiz verilmiştir. Döküm sonrasında numunede 42 ppm bor elde edilmiştir.

Çizelge 6.9. 20 ppm oranında bor oluşturmak için 1,54 gr ferrobör ilavesi sonrası 1 adet dökülen Ç1020 çeliğinin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Döküm No	Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
5	Ç1020	0.148	0.406	0.204	0.016	0.020	<0.0001	0.005	0.0042	0.0154

Çizelge 6.10. Birinci döküm sonrası dökülen değişik oranlarda bor içeren Ç1020 çeliğinin % ağırlık olarak kimyasal analizlerinin karşılaştırılması

Döküm No	Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
1.-1	Ç1020	0.163	0.484	0.249	0.017	0.020	0.013	0.041	<0.0001	0.0092
1.-2	Ç1020	0.153	0.484	0.250	0.017	0.020	0.010	0.043	<0.0001	0.0087
2.-1	Ç1020	0.152	0.485	0.254	0.016	0.018	0.010	0.041	0.0007	0.0091
2.-2	Ç1020	0.167	0.479	0.245	0.016	0.020	0.022	0.038	0.0006	0.0196
3.-1	Ç1020	0.148	0.482	0.247	0.017	0.020	0.006	0.036	0.0015	0.0107
3.-2	Ç1020	0.150	0.473	0.247	0.016	0.019	0.004	0.035	0.0015	0.0116
4.-1	Ç1020	0.156	0.458	0.238	0.017	0.020	0.002	0.024	0.0026	0.0115
4.-2	Ç1020	0.145	0.451	0.232	0.015	0.017	<0.0001	0.035	0.0029	0.0129
5	Ç1020	0.148	0.406	0.204	0.016	0.020	<0.0001	0.005	0.0042	0.0154

Çizelge 6.10 da birinci döküm sonrasında elde edilen numunelerin kimyasal analizlerinin sonuçları bir arada verilmiştir. Birinci döküm işleminde alüminyum ve titanyum ilavesinden sonra kimyasal analiz yapılarak alüminyum ve titanyum yaklaşık olarak arzu edilen oranlarda çıkmıştır. Fakat silisyum oranı % 0,15-0,30 değerlerinde olması gerekirken, yanma sonucu % 0,091 düşmüştür. Ergiyik içerisine % 70 oranında silisyum içeren ferro silisyumdan % 0,25 oranında silisyum elde edilmesi için 85 gr ferro silisyum ilave edilmiştir. Seramik kalıba döküm işlemine geçilene kadar 1630 °C de 7 ila 9 dakika sıvı metal kimyasal analiz ve silisyum

ilavesi için bekletilmiştir. Bu 7 ila 9 dakika geçen sürede başlangıçta 6 ppm olan bor yanmış ve 0,0001 seviyelerinin altına düşmüştür. Alüminyum (Çizelge 6.4.) 640 ppm oranından iken, 130 ppm'e düşmüştür. Titanyum ise 640 ppm'lerden 410 ppm'lere düşmüştür. Mevcut silisyum % 0,146 (Çizelge 6.3.) iken, 7 ila 9 dakika kimyasal analiz ve silisyum ilavesi için zaman kaybı neticesinde % 0,091'lere (Çizelge 6.4.) düşmüştür. Gaz boşluklarının oluşumunu engelleyen silisyumu olması gereken değere çıkarmak için, % 70 oranında ferro silisyum ilavesi ile silisyum oranı % 0,249 değerlerine çıkmıştır. Ferro silisyum ilavesinden sonra bor ilavesi yapılmış ve zaman kaybı her dökümde yaklaşık olarak 10 ila 15 saniye olmuştur. Ayrıca titanyum miktarındaki azalışa ters oranda azot miktarında artış dikkate değer bulunmuştur.

6.6. İkinci Döküm İşlemi

Ankara/Furkan Mühendislik A.Ş.'de ikinci döküm işleminde 34.814 kg Ç1020 çeliği indüksiyon ocağına şarj edilmiştir. Şarj malzemesinin ergimesi yaklaşık 1 saati bulmuştur. Ç1020 malzemesi 1630 °C'de ergime işlemi gerçekleştirildikten sonra birinci dökümde yapılan işlemler takip edilmiştir.

34,814 kg Ç1020 şarj malzemesi için indüksiyon ocağının vakumsuz olması ve atmosfere açık olması nedeniyle 400 ppm ilave edilmesi düşünülen alüminyum ve titanyum, 600 ppm olarak ilave edilmiştir. Fakat birinci dökümün sonunda alüminyumun 1 ppm'in altına düşmesi nedeniyle ikinci dökümde daha fazla alüminyum ilave edilmiştir. 224 gr (16 kat) ilave edilmiş ve her bor ilavesinden sonra alüminyum takviye edilerek alüminyum miktarının sabit kalması sağlanmıştır. Birinci dökümün sonunda titanyumun yanması daha az olduğu için sadece ikinci dökümün başlangıcında 70 gr (5 kat) olarak ilave edilmiştir.

Fakat ikinci dökümde kimyasal analiz yapılmadığından birinci dökümdeki kimyasal analizler için harcanan 7 – 9 dakikalık kayıp zaman gözden kaçmış titanyum ve özellikle alüminyum miktarı istenenden çok fazla çıkmıştır. İkinci bor ilavesinde ise, birinci dökümdeki ilave işleminin benzeri uygulanmış ve artış yapılmamıştır. Silisyumda ise, 90 gr % 70 oranında silisyum içeren ferro silisyum ilave edilerek

silisyum oranında gaz oluşumu nedeniyle oluşan kayıp engellenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca her bor oranından 2 döküm yerine 1 adet döküm yapılmıştır. Çizelge 6.11.'de ikinci dökümün ilk numunesinin kimyasal analizi verilmiştir. İkinci dökümlerin kimyasal analizlerin tamamı Ankara/Furkan Mühendislik A.Ş.'de ve Gebze TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü'nde yapılmıştır.

Çizelge 6.11. 10 ppm bor için 0,77 gr ferrobor ilavesi sonrası 1 adet dökülen Ç1020 çeliğinin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Döküm No	Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
6	Ç1020	0.189	0.687	0.325	0.018	0.023	0,404	0.095	0.0010	0.0115

Çizelge 6.11. de 10 ppm oranında bor için 0,77 gr ferrobor ilavesi sonrası dökülen Ç1020 çeliğinin bor oranı 10 ppm olarak çıkmıştır. Alüminyum % 0,404 oranında ve titanyum ise % 0,095 oranlarında çıkmıştır. Alüminyum ve titanyum için istenilen oranların çok üstünde olmasına rağmen bu oranlar sabit tutularak optimum bor oranlarının belirlenmesi sağlanmıştır.

7 numaralı döküm öncesi 15 ppm oranında bor için 1,16 gr ferrobor ilave edilmiştir. İlave sonrası elde edilen dökümün kimyasal analizi Çizelge 6.12.'de verilmiştir.

Çizelge 6.12. 15 ppm oranında bor için 1,16 gr ferrobor ilavesi sonrası 1 adet dökülen Ç1020 çeliğinin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Döküm No	Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
7	Ç1020	0.192	0.695	0.334	0.018	0.022	0,411	0.096	0.0017	0.0084

Çizelge 6.12. de verilen 7 numaralı dökümün kimyasal analiz sonucunda bor oranı istenilen miktarda (17 ppm) olarak elde edilmiştir. Alüminyum ve titanyumun oranları ise sabit oranlarda kalması sağlanmıştır.

8 numaralı döküm öncesi 10 ppm oranında bor ilavesi için 0,77 gr ferrobor ve 600 ppm oranında alüminyum için 14 gr % 99 saflıkta alüminyum ilave edilmiştir. 8 numaralı dökümün kimyasal analizi Çizelge 6.13.'de verilmiştir.

Çizelge 6.13. 10 ppm oranında bor ilavesi için 0,77 gr ferrobor ve 600 ppm oranında alüminyum ilavesi için 14 gr % 99 saflıkta alüminyum ilavesi sonrası dökülen 1 adet Ç1020 çeliğinin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Döküm No	Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
8	Ç1020	0.185	0.694	0.330	0.018	0.022	0,449	0.099	0.0019	0.0118

Çizelge 6.13. de verilen 8 numaralı dökümün kimyasal analiz sonucu bor oranı 19 ppm olarak elde edilmiştir. Alüminyum % 0,411'den % 0,449'a çıkarken, titanyum % 0,099 olarak belirlenmiştir.

9 numaralı döküm öncesi 10 ppm oranında bor ilavesi için 0,77 gr ferrobor ilave edilmiştir. 9 numaralı dökümün kimyasal analizi Çizelge 6.14.'de verilmiştir.

Çizelge 6.14. 10 ppm oranında bor ilavesi için 0,77 gr ferrobor ilavesi sonrası dökülen 1 adet Ç1020 çeliğinin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Döküm No	Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
9	Ç1020	0.190	0.684	0.338	0.017	0.020	0,424	0.094	0.0023	0.0077

Çizelge 6.14. de verilen 9 numaralı dökümün kimyasal analiz sonucunda bor oranı 23 ppm olarak elde edilmiştir. Alüminyum % 0,424 iken, titanyum % 0,094 olarak belirlenmiştir.

10 numaralı döküm öncesinde 15 ppm oranında bor ilavesi için 1,16 gr ferrobor ve 600 ppm oranında Alüminyum ilavesi için 14 gr % 99 saflıkta Alüminyum ilave edilmiştir. 10 numaralı dökümün kimyasal analizi Çizelge 6.15.'de verilmiştir.

Çizelge 6.15. 15 ppm oranında bor ilavesi için 1,16 gr ferrobor ve 600 ppm oranında alüminyum ilavesi için 14 gr % 99 saflıkta alüminyum ilavesi sonrası dökülen 1 adet Ç1020 çeliğinin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Döküm No	Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
10	Ç1020	0.185	0.697	0.332	0.018	0.022	0,476	0.095	0.0032	0.0119

Çizelge 6.15.'de verilen 10 numaralı dökümün kimyasal analiz sonucunda bor oranı 32 ppm olarak belirlenmiştir.

11 numaralı döküm öncesinde 15 ppm oranında bor ilavesi için 1,16 gr ferrobor ilave edilmiştir. 11 numaralı dökümün kimyasal analizi Çizelge 6.16.'da verilmiştir.

Çizelge 6.16. 15 ppm oranında bor ilavesi için 1,16 gr ferrobor ilavesi sonrası 1 adet dökülen Ç1020 çeliğinin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Döküm No	Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
11	Ç1020	0.187	0.687	0.349	0.017	0.020	0,454	0.095	0.0042	0.0106

Çizelge 6.16.'da verilen 11 numaralı dökümün kimyasal analiz sonucunda bor oranı 42 ppm olarak belirlenmiştir. Alüminyum % 0,454 iken, titanyum % 0,095 olarak belirlenmiştir.

12 numaralı döküm önce 10 ppm oranında bor ilavesi için 0,77 gr ferrobor ilave edilmiştir. 12 numaralı dökümün kimyasal analizi Çizelge 6.17.'de verilmiştir.

Çizelge 6.17. 10 ppm oranında bor ilavesi için 0,77 gr ferrobor ilavesi sonrası dökülen 1 adet Ç1020 çeliğinin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Döküm No	Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
12	Ç1020	0.183	0.675	0.357	0.018	0.021	0,425	0.089	0.0049	0.0135

Çizelge 6.17.'de verilen 12 numaralı dökümün kimyasal analiz sonucunda bor oranı 49 ppm olarak belirlenmiştir. Alüminyum % 0,425 iken, titanyum % 0,089 olarak belirlenmiştir.

25 ppm oranında bor ilavesi için 1,88 gr ferrobor ve 400 ppm oranında alüminyum ilavesi için 10 gr % 99 saflıkta alüminyum ilave edilmiştir. 13 numaralı dökümün kimyasal analizi Çizelge 6.18.'de verilmiştir.

Çizelge 6.18. 25 ppm oranında bor için 1,88 gr ferrobor ve 400 ppm oranında alüminyum ilavesi için 10 gr % 99 saflıkta alüminyum ilavesi sonrası dökülen 1 adet numunenin % ağırlık olarak kimyasal analizi

Döküm No	Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
13	Ç1020	0.193	0.707	0.358	0.018	0.022	0,453	0.097	0.0063	0.0077

Çizelge 6.18.'de verilen 13 numaralı dökümün kimyasal analiz sonucunda bor oranı 63 ppm olarak belirlenmiştir. Alüminyum % 0,453 iken, titanyum % 0,097 olarak belirlenmiştir.

İkinci döküm sonrasında elde edilen numunelerin % olarak kimyasal analizleri karşılaştırması Çizelge 6.19.'da verilmiştir.

Çizelge 6.19. İkinci döküm sonrası dökülen kare malzemelerin % ağırlık olarak kimyasal analizlerinin karşılaştırılması

Döküm No	Malz.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Ti	% B	% N
6	Ç1020	0.189	0.687	0.325	0.018	0.023	0,404	0.095	0.0010	0.0115
7	Ç1020	0.192	0.695	0.334	0.018	0.022	0,411	0.096	0.0017	0.0084
8	Ç1020	0.185	0.694	0.330	0.018	0.022	0,449	0.099	0.0019	0.0118
9	Ç1020	0.190	0.684	0.338	0.017	0.020	0,424	0.094	0.0023	0.0077
10	Ç1020	0.185	0.697	0.332	0.018	0.022	0,476	0.095	0.0032	0.0119
11	Ç1020	0.187	0.687	0.349	0.017	0.020	0,454	0.095	0.0042	0.0106
12	Ç1020	0.183	0.675	0.357	0.018	0.021	0,425	0.089	0.0049	0.0135
13	Ç1020	0.193	0.707	0.358	0.018	0.022	0,453	0.097	0.0063	0.0077

İkinci döküm sonrası elde edilen bor oranları 10, 17, 19, 23, 32, 42, 49 ve 63 ppm oranlarındadır. Optimum bor oranını belirlemek için elde edilen bor oranları aralığı istenilen düzeydedir. Alüminyum sabit kalması için ilaveler yeterli olmuş ve alüminyum oranı yaklaşık aynı düzeyde kalmıştır. Titanyum oranında ise dökümler arası zaman kaybı olmamasından dolayı başlangıçta ilave edilen orana bağlı kalınmış ve herhangi bir kayıp olmamıştır. Silisyum ve diğer elementlerde herhangi bir kayıp olmamıştır. İkinci döküm optimum bor oranını belirlemek amacıyla kullanılabilir.

6.7. Haddeleme İşlemi

Haddeleme işlemi, Gebze TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü'nde yapılmıştır. 30x30x350 mm uzunluğunda numunelerin boyutlarının fırın içerisine uygun olarak yerleştirmek ve haddeleme sırasında ısı kaybını önlemek için hidrolik testerede ikiye bölünerek 175 mm uzunluklarda numuneler elde edilmiştir. Protherm PLF 130/6 markalı dijital ekranlı fırında numuneler birbirine değmeyecek şekilde 4'er adet yerleştirilmiştir. Fırın sıcaklığı 1200 °C sıcaklığa ayarlanarak fırın sıcaklığının 1200 °C gelmesi için fırın soğukken yaklaşık 1 saat, fırın sıcakken ise yaklaşık olarak 15 dakika beklenmiştir. Fırın sıcaklığı 1200 °C'ye ulaştıktan sonra 60 dakika numuneler bekletilerek östenite tamamen dönüşümü sağlanmıştır. Haddeleme işleminin yapılacağı soğuk merdanelere sıcak numunelerin yapışmaması için merdanelerin yüzeyleri ısıtıcı (şamanel) ile ısıtılmıştır. Merdanelerin yüzey sıcaklığının yaklaşık 200 ila 250 °C'ye ulaşması sağlanmıştır. 1200 °C sıcaklıkta 60 dakika bekletilen numuneler HILLE marka sıcak haddeleme cihazında 2 pasoda haddeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıcak haddeleme cihazında 175 mm boyunda 30x30 kare parçalar, 8 mm kalınlığında 40mm genişliğinde ve 380 mm uzunluğunda levhalara dönüştürülerek % 70 - 80 oranında deformasyon uygulanmıştır. Malzeme enine 1:3 oranında uzarken, boyuna 2,5 katı uzama meydana gelmiştir. Birinci döküm numunelerinin iki paso uygulanarak haddeleme işleminden sonraki 1. ve 2. paso çıkış sıcaklıkları Çizelge 6.20.'de verilmiştir. Paso çıkış sıcaklıkları Lazerli (Kızılötesi) Termometre ile ölçülmüştür.

Çizelge 6.20. Birinci döküm numunelerin (Ç1020) haddeleme işleminde pasolar arası çıkış sıcaklıkları

Numune No	Başlangıç sıcaklığı ve 60 dk bekleme sıcaklığı (°C)	1. Paso Çıkış Sıcaklık Ortalama (°C)	2. Paso Çıkış Sıcaklık Ortalama (°C)
1-1	1200	1025	947
1-2	1200	1040	971
2-1	1200	1057	912
2-2	1200	1058	956
3-1	1200	1026	965
3-2	1200	1024	902
4-1	1200	1007	841
4-2	1200	1020	908
5	1200	1051	925

Numunelerin ortalama olarak 1. paso çıkış sıcaklığı 1035 °C iken 2. paso çıkış sıcaklığı ise 926 °C'dir. Önemli olan 2. paso çıkış sıcaklığının östenit bölgesi altına düşmemesidir. 926 °C'de östenit bölgesinde haddeleme işlemi tamamlanmış ve numuneler havada soğutulmaya bırakılmıştır.

İkinci döküm sonrası elde edilen numunelerde haddelenmiş ve birinci döküm numunelerine göre haddeleme sonunda levha kalınlığı 8 mm değil 10 mm kalınlığında kalmış ve % 66 oranında bir sıcak deformasyon uygulanmıştır. 2. döküm numunelerde de iki paso uygulanmış ve paso çıkış sıcaklıkları Çizelge 6.21.'de verilmiştir.

Çizelge 6.21. İkinci döküm numunelerin (Ç1020) pasolar sonrası çıkış sıcaklıkları

Numune No	Başlangıç sıcaklığı ve 60 dk bekleme sıcaklığı (°C)	1. Paso Çıkış Sıcaklık Ortalama (°C)	2. Paso Çıkış Sıcaklık Ortalama (°C)
6	1200	1011	890
7	1200	1015	930
8	1200	1010	965
9	1200	1049	966
10	1200	1015	920
11	1200	1045	923
12	1200	1083	982
13	1200	1040	958

İkinci döküm sonrası 1. paso çıkış sıcaklıkları ortalama 1039 °C iken, 2. paso çıkış sıcaklıkları ortalaması 942 °C'dir. 942 °C de östenit bölgesinde haddelme işlemi tamamlanmış ve haddelenen numuneler havada soğutulmaya bırakılmıştır.

6.8. Mikroyapı İncelemesi

6.8.1. Optik mikroskop ile inceleme

Optik mikroskop incelemeleri Gebze TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Laboratuvarları'nda yapılmıştır. Haddelenmiş Ç1020 çeliği Struers Unitom 50 markalı cihazda kesilerek haddelme yönüne paralel ve dik yönde numuneler alınmıştır. Alınan numuneler Struers Prontopress 20 cihazında sıcak kalıplama yöntemi ile kalıplama işlemi yapılmıştır. Kalıplanan numuneler ise Metkon Gripo 1V markalı cihazda zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalama işleminde 60, 120, 180, 240, 320, 600, 1200 ve 2500 numaralı zımparalar ile numunelerin yüzeyleri zımparalanmıştır. Parlatma işlemi Struers Rotoforce 4 markalı parlatma cihazında sırasıyla 1 ve 3 mikronluk elmas pasta ile silika yağlayıcı kullanarak yapılmıştır. Daha sonra, numuneler % 2'lik nital çözeltisi (2ml HNO₃ + 98 ml etanol) ile 10 saniye dağlanarak alkol ile yıkanıp kurulandıktan sonra, optik mikroskopta incelenebilecek hale getirilmiştir.

Mikroyapı fotoğrafları Nikon Eclipse L150 markalı cihazda çekilmiştir. Mikroyapı fotoğrafları hadde yönüne dik ve paralel olmak üzere iki yönlü olarak incelenmiştir. Mikroyapılardan X100 büyütmede Çizgi Kesme Yöntemi (HEYN Yöntemi) kullanılarak tane boyutu ve ASTM numarası hesaplanmıştır. Mikroyapı fotoğrafları çekilecek numunelerin özellikle orta kısımlarından görüntü alınmasına özen gösterilmiştir.

6.8.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile inceleme

Optik mikroskopla tesbit edilemeyen tane içerisinde veya tane sınırında bulunan köşeli parçacıkları ve küresel küçük oluşumları tesbit etmek için kullanılmıştır. Optik

mikroskopta inceleme için hazırlanarak kullanılmış numunelerin yüzeyleri tekrar SEM incelemesi için Struers Rotoforce 4 markalı parlatma cihazında sırasıyla 1 ve 3 mikronluk elmas pasta ile silika yağlayıcı kullanarak parlatılmıştır. Daha sonra, % 2'lik nital çözeltisi (2ml HNO₃ + 98 ml etanol) ile 10 saniye dağlanan numuneden ikincil elektron yöntemi ile SEM görüntüleri Gebze TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Laboratuvarları'nda elde edilmiştir.

6.8.3. Elektron prob mikroanaliz cihazı (EPMA) ile inceleme

SEM incelemesi için kullanılan numuneler üzerinden EPMA incelemesi gerçekleştirilmiştir. EPMA tekniğinde oldukça kararlı (akım yoğunluğu, hızlandırma voltajı ve sabit demet çapı) bir elektron demetinin numuneye gönderilmesi sonucunda meydana gelen demet-numune etkileşimiyle açığa çıkan karakteristik X-ışınlarının dalga boylarına sınıflandırılmasıyla elementel analiz yapılır. EDS tekniğine göre çok daha yüksek hassasiyette kalitatif ve tam kantitatif analiz yapabilme yeteneği mevcuttur. EPMA Lityum, helyum ve hidrojen harici hafif elementleri de içeren geniş element belirleme aralığına sahiptir. İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Adnan Tekin Laboratuvarı'nda bulunan Cameca SX-100 (3 WDS üniteli) markalı EPMA cihazı ile optik mikroskop ve SEM ile tesbit edilemeyen borun mikroyapı içerisindeki dağılımını tesbit etmek için kullanılmıştır.

6.9. Mekanik Testler

6.9.1. Sertlik deneyi

Mikroyapı fotoğrafları çekilen numuneler üzerinde Gebze TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Laboratuvarları'nda Zwick ZWV 10 marka mikro sertlik cihazında haddeleme yönüne dik ve haddeleme yönüne paralel olmak üzere 5 farklı bölgelerden sertlik ölçümleri yapılmış ve bunların ortalamaları sonuç olarak değerlendirilmiştir. Başlangıçta mikro sertlik cihazında 1 kg ve 5 kg yük uygulanmış, 1 kg yükün daha küçük tanelere ya da perlite denk gelmesi nedeniyle sonucun yanlış olabileceği düşünülmüştür. Mikro sertlik cihazında 5 kg yükün daha fazla taneyi

kapsayarak doğru bir ölçüm vereceği görülmüştür. Sertlik testlerimizde Vickers sertlik metodu kullanılmıştır.

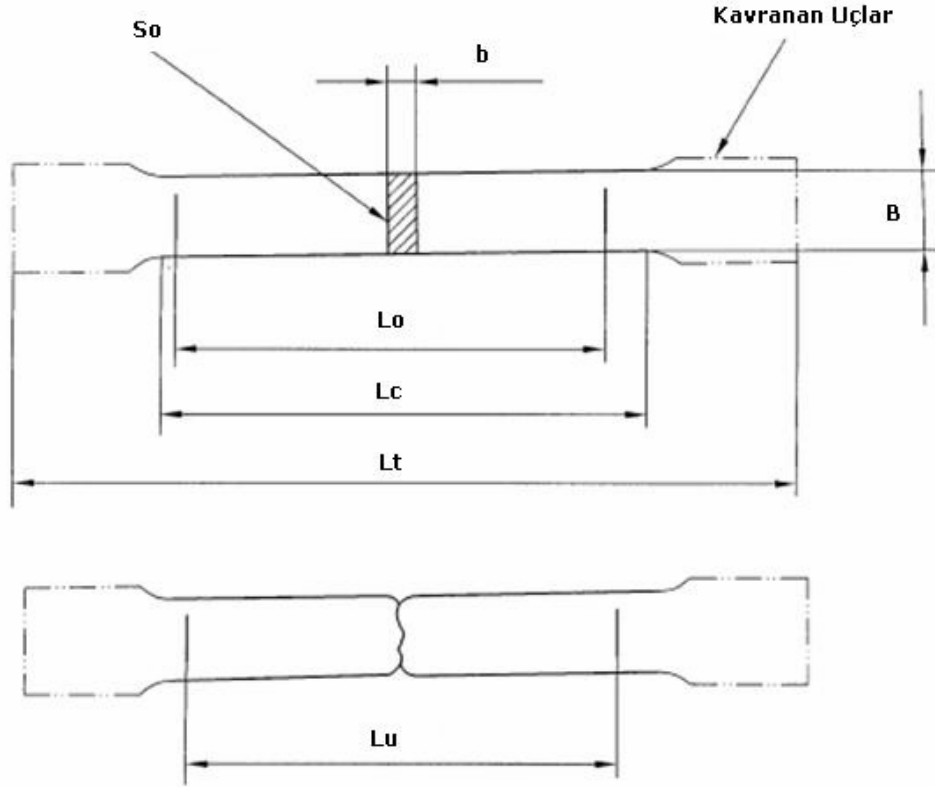
6.9.2. Darbe deneyi

Numunelerin yeterli olmaması, CNC tezgahında yeterli numune çıkmaması ve CNC tezgahının hassasiyetinin 100/1-2 olması gibi nedenlerle daha hassas olan ve yeterli sayıda numune çıkarmamıza olanak sağlayan Gebze Teknikmak A.Ş.'de olan CNC Tel Erozyon Cihazında darbe deney numuneleri kesilmiştir. Darbe deney numuneleri TSEN 1045-1 standardına göre çentikli olarak hazırlanmıştır. Haddelenmiş numuneler Şhmer Marka CNC Tel Erozyon Cihazında 0,25 mm kalınlığındaki pirinç tel aracılığıyla 1000/1-2 hassasiyetinde kesilmiştir. Her numuneden 4'er adet hazırlanarak Gebze TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Laboratuarlarında darbe deneyleri yapılmıştır.

6.9.3. Çekme deneyi

Çekme deneyi Zwick Z250 markalı çekme cihazı kullanılmıştır. Haddelenmiş numuneler Gebze Teknikmak A.Ş.'de Şhmer Marka CNC Tel Erozyon Cihazında hazırlanmıştır.

Çekme deney numuneleri TSEN 10002-1 standardına göre hazırlanmıştır(Şekil 6.4). Çizelge 6.22.'de ise çekme deneyi numunesinin ölçüleri vardır. Gebze TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Laboratuarlarında her numuneden 4'er adet kullanılarak çekme deneyi yapılmıştır.



Şekil 6.4. Çekme deneylerinde kullanılan dikdörtgen çekme deney numunesi

Çizelge 6.22. Çekme deneyinde kullanılan deney numunesinin boyutları

Sembol	Değer	Anlam
b	5 mm	Kalınlık
B	15 mm	Genişlik
L_c	77 mm	Paralel Uzunluk
L_t	160 mm	Toplam Uzunluk
L_o	70 mm	İlk Ölçü Uzunluğu
L_u	-	Son Ölçü Uzunluğu
S_o	75 mm ²	İlk Kesit Alanı

6.10. Isıl İşlem ve Yaşlandırma İşlemleri

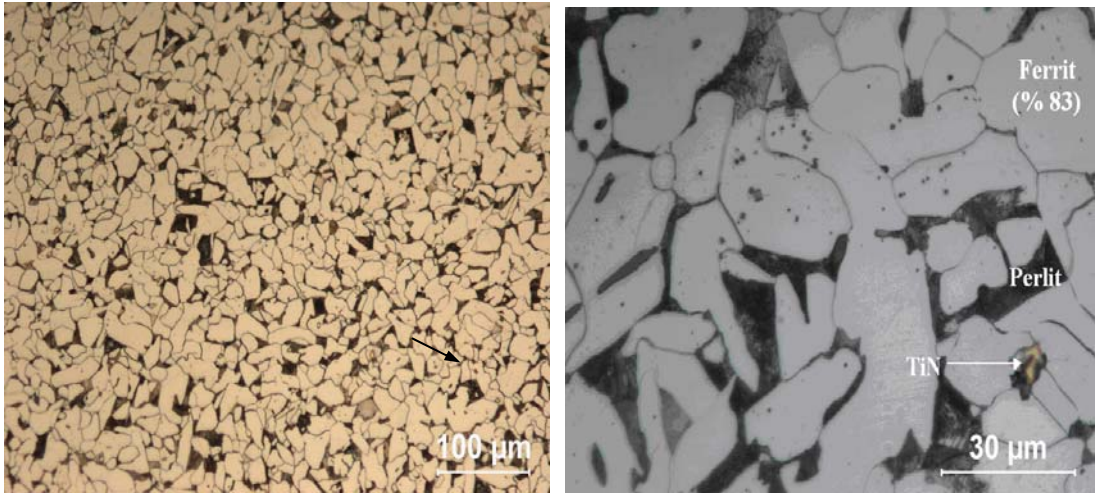
Ç1020 çeliğinin ısıtılma aralığı 830 ila 900 °C arasındadır. Bundan dolayı Ç1020 çeliği ısıtılma işlemi için 875 °C seçilmiştir. Bekletme süresi ise numune kalınlığına göre belirlenmiştir. Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Laboratuvarları'nda borsuz, 15 ve 26 ppm bor içeren Ç1020 numuneleri 875 °C'de 60 dakika fırında bekletildikten sonra, numunelere havada ve suda soğutma olmak üzere iki tür ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Havada ve suda soğutulan numunelerin mikroyapıları, optik mikroskop ile Vickers sertlik metodu ile de sertlikleri belirlenmiştir.

Suda soğutulan numunelere değişik sürelerde yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Bu işlemde borsuz, 15 ve 26 ppm bor içeren Ç1020 numunelerin yaşlanma eğilimi olup olmadığını görmek amaçlanmıştır. Suda soğutulan numunelerin her birine 2, 4, 6 ve 8 saat 200 °C sabit sıcaklıkta bekletilerek yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Yaşlandırma sonunda numunelerin Vickers sertlik değerleri ölçüldükten sonra karşılaştırılmıştır.

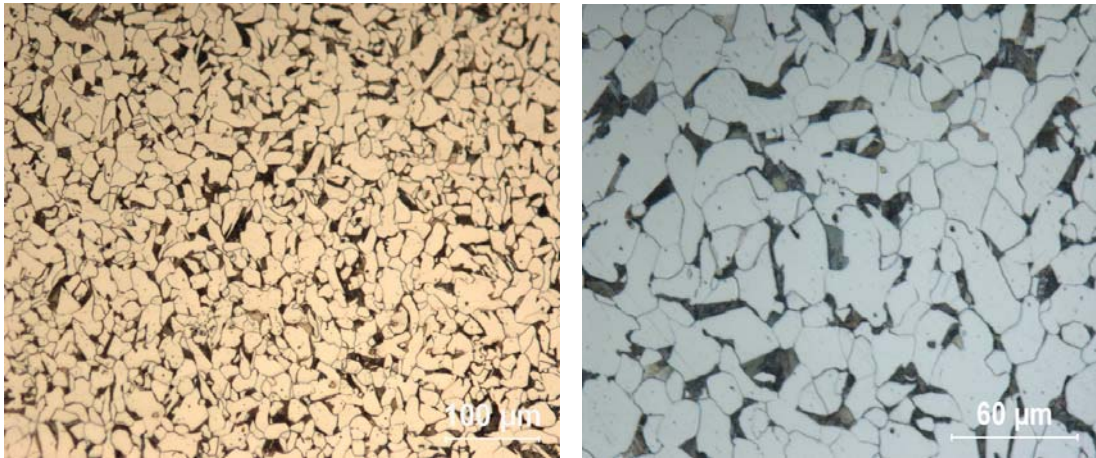
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. Optik Mikroakop İncelemeleri

Birinci döküm işleminden elde edilen Resim 7.1.'de Ç1020 çeliğinin borsuz malzemenin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı görülmektedir. Resim 7.2.'de ise, Ç1020 borsuz malzemenin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı verilmektedir.

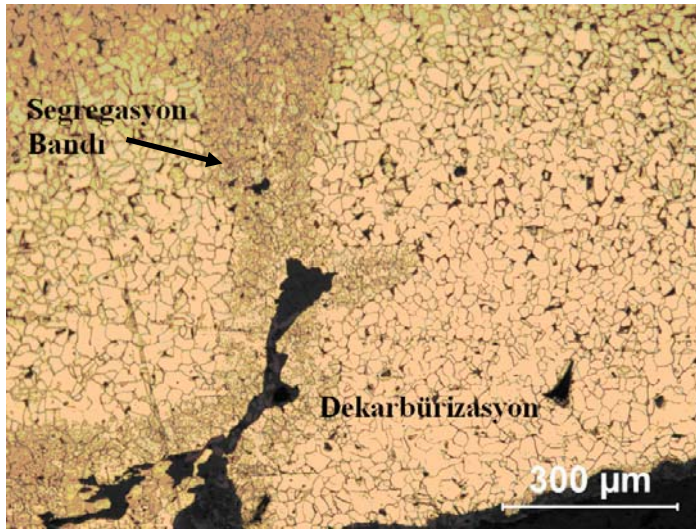


Resim 7.1. 1-1 numaralı borsuz Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı



Resim 7.2. 1-1 numaralı borsuz Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

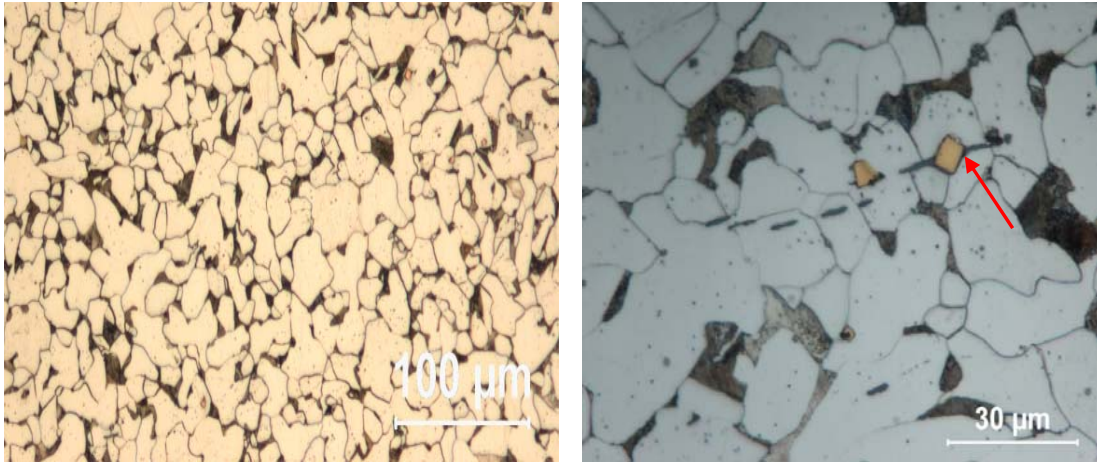
Resim 7.1. ve 7.2.'de verilen fotoğraflarda haddeleme sonrası tanelerin tamamen dönüşümün gerçekleştiği ve ferritin perlitte göre daha yoğun olduğu görülmektedir. Resim 7.1'de 30 μm 'luk büyütmedeki okla gösterilen turuncu renkteki tam köşegenli şekillerin titanyum nitrür (TiN) olduğu SEM incelemesi ile anlaşılmıştır. Resim 7.1. ve 7.2.'de verilen fotoğraflarda haddeleme sonrası perlit tanelerinin iğnesel olduğu görülmektedir.



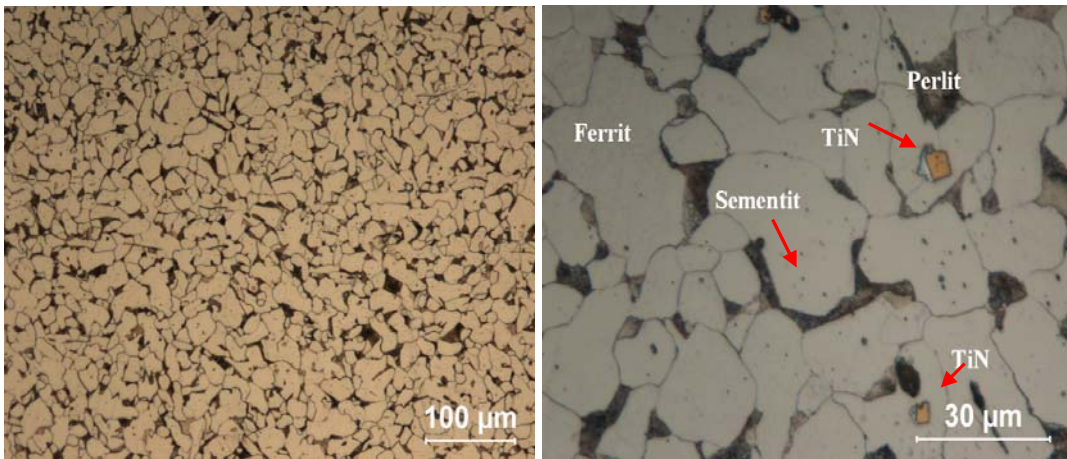
Resim 7.3. 1-1 numaralı borsuz Ç1020 malzemesinin kenar bölgesinden haddeleme yönüne paralel olarak çekilmiş mikroyapı fotoğrafı.

Resim 7.3. de verilen mikroyapı fotoğraflarında görülen bölgelerde numunede dekarbürizasyon meydana geldiği görülmektedir. Meydana gelen dekarbürizasyon, çatlaklardan dolayı içerisine hava girmesi veya karbonun tamamen yanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dekarbürizasyon istenmeyen bir durumdur. Ayrıca, Resim 7.3'de numunede ok ile gösterilen bölgelerde segregasyon bandı olduğu da gözlenmiştir.

Resim 7.4 .de Ç1020 çeliğinin 7 ppm oranında bor içeren malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı görülmektedir. Resim 7.5.'de ise Ç1020 çeliğinin 7 ppm oranında bor içeren malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapıları görülmektedir.



Resim 7.4. 2-1 numaralı 7 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddelenme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

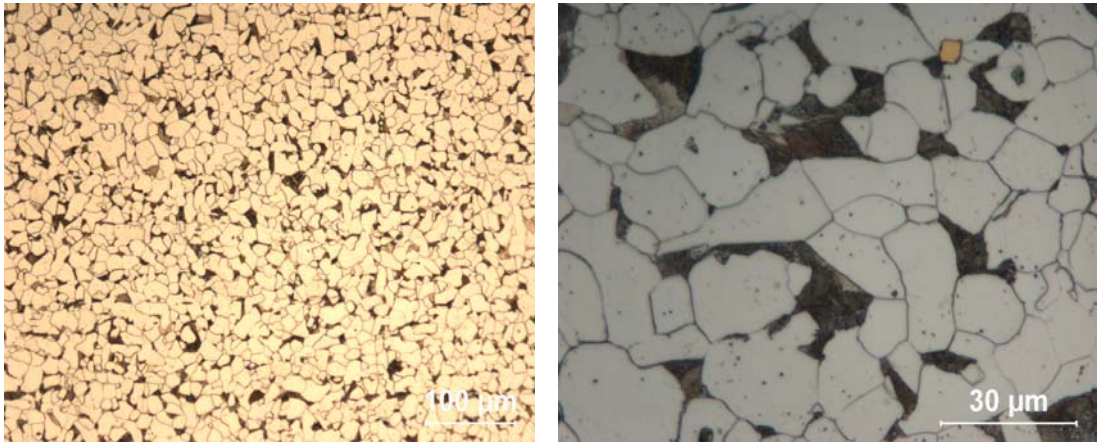


Resim 7.5. 2-1 numaralı 7 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddelenme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

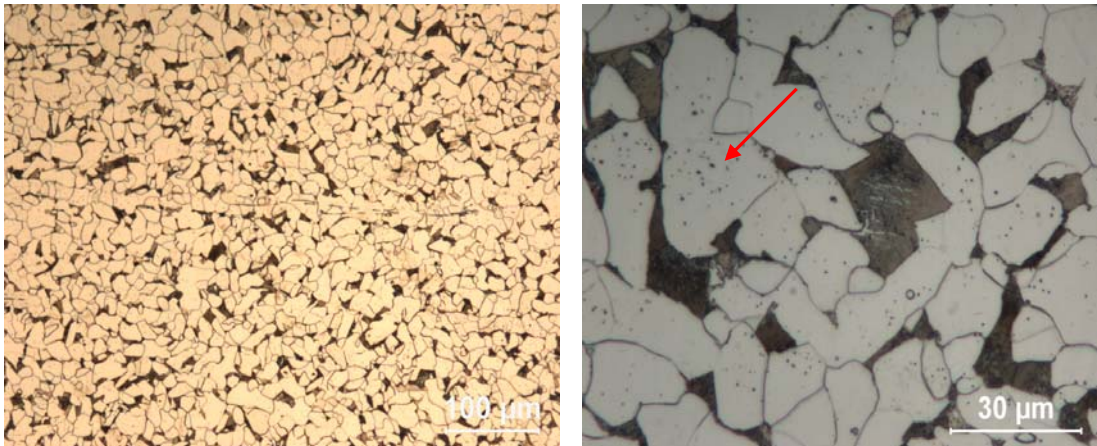
Resim 7.4. ve 7.5. de verilen haddelenme yönüne dik ve paralel mikroyapı fotoğrafları arasında sıcak haddelenme olması nedeniyle tanelerde herhangi hadde yönünde uzama görülmemektedir. Resim 7.4. ve 7.5.'de tane boyutunun homojen ve tane şeklinin eş eksenli olduğu görülmektedir. Resim 7.5. de 30 µm'luk büyütmedeki okla gösterilen turuncu renkteki köşeli parçacıkların TiN olduğu, bunların zaman zaman tane sınırında ve zaman zaman tane içinde olduğu SEM ile yapılan incelemede tesbit edilmiştir. TiN etrafında görülen gri renkli partiküllerin ne olduğu tesbit edilememiştir. Ferit tane içerisinde görülen küresel noktaların ise sementit olduğu SEM incelemesi sonucu anlaşılmıştır.

Resim 7.4. ve 7.5.'de 7 ppm bor içeren Ç1020 çeliğinin mikroyapı fotoğraflarında borsuz Resim 7.1. ve 7.2.'de verilen fotoğraflarda görülen malzemeye göre daha az ferrit fazı olduğu görülmektedir. Yapılan hesaplamalar neticesinde borsuz malzemenin ferrit faz oranı % 82,6 iken, 7 ppm bor içeren malzemenin ferrit fazı oranı % 88,1 olduğu gözlenmiştir.

Resim 7.6.'da Ç1020 çeliğinin 15 ppm oranında bor içeren malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı görülmektedir. Resim 7.7.'de ise, Ç1020 çeliğinin 15 ppm oranında bor içeren malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapıları görülmektedir.



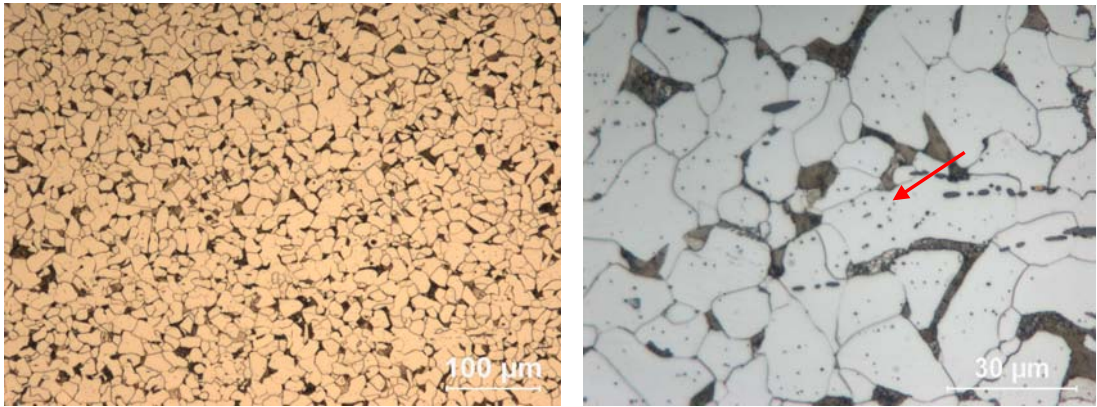
Resim 7.6. 3-1 numaralı 15 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı



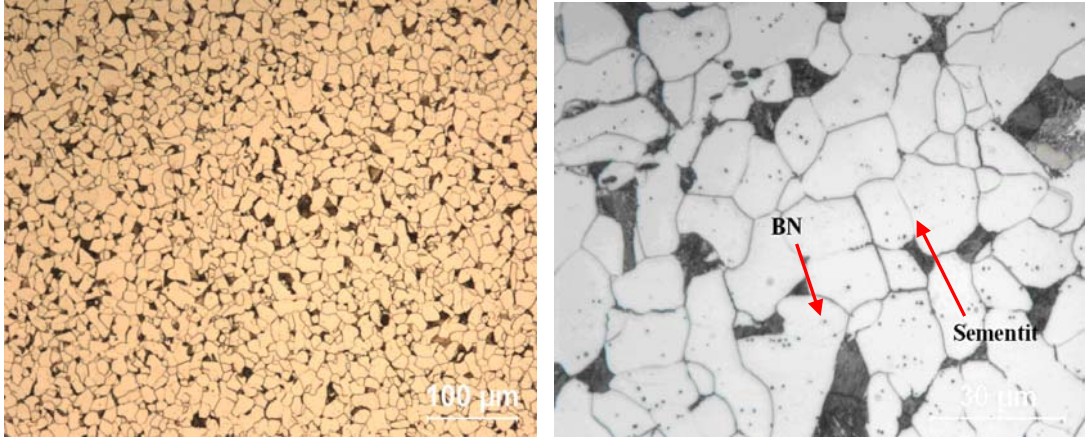
Resim 7.7. 3-1 numaralı 15 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

Resim 7.6. ve 7.7.'de görülen 15 ppm oranında borlu malzemenin tane yapısı ile 7 ppm bor içeren borlu malzemenin fotoğraflarında görülen tane boyutları arasında belirgin bir fark görülmemiş ve ASTM tane numaraları 5 olarak belirlenmiştir. Fakat ok ile gösterilen tane içerisindeki noktaların 15 ppm bor içeren borlu malzemede 1 ve 7 ppm bor içeren malzemelere göre bor oranının artmasıyla daha belirgin bir artış olduğu gözlenmektedir. Resim 7.6. ve 7.7.'de tanelerin boyutunun homojen ve şeklinin eşkenarsal olduğu görülmektedir.

Resim 7.8.'de Ç1020 çeliğinin 26 ppm oranında bor içeren malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı görülmektedir. Resim 7.9.'da ise, Ç1020 çeliğinin 26 ppm oranında bor içeren malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapıları görülmektedir.



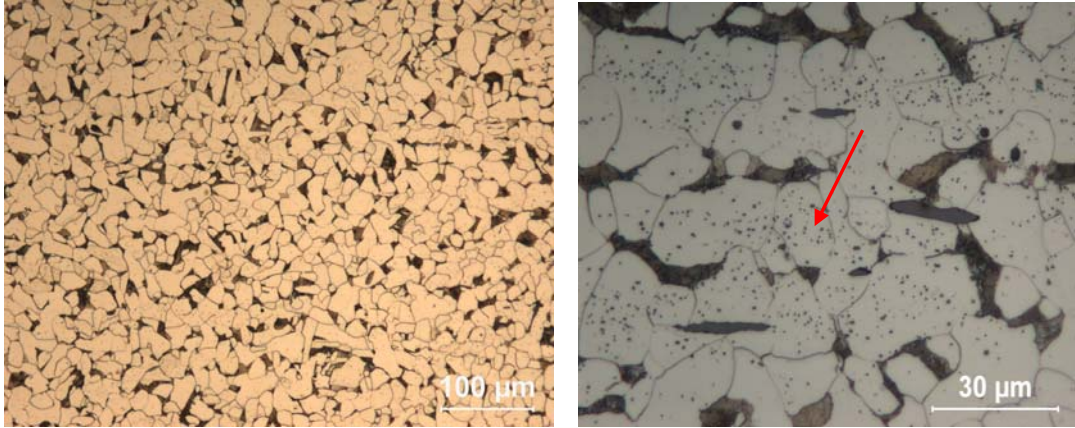
Resim 7.8. 4-1 numaralı Ç1020 26 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı



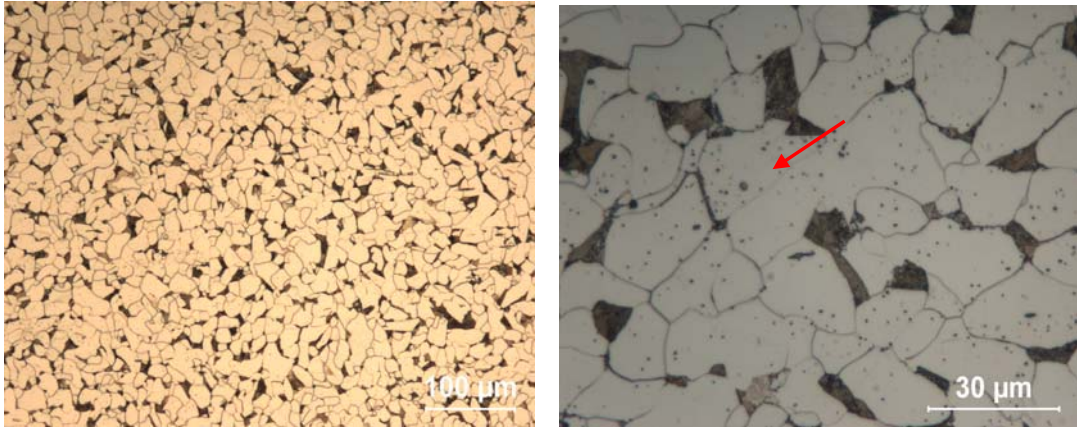
Resim 7.9. 4-1 numaralı Ç1020 26 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddelenme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

Resim 7.6. ve 7.7.'de görülen 15 ppm malzemenin mikroyapı fotoğraflarında okla gösterilen noktaların Resim 8. ve 9.'da görülen 26 ppm malzemenin mikroyapı fotoğraflarında da görülmektedir. Resim 7.8. ve 7.9. ok ile gösterilen tane içerisindeki noktaların 26 ppm bor içeren borlu malzemede 1 ve 7 ppm bor içeren malzemelere göre, bor oranının artmasıyla birlikte daha belirgin bir artış olduğu gözlenmektedir. Bunun nedeninin ise, EPMA ile yapılan incelemede siyah renkte noktalarının bazılarının BN (Bor Nitrür) olduğu ve bor oranının artmasıyla birlikte siyah küresel noktalarında arttığı tesbit edilmiştir. Ayrıca Resim 7.8. ve 7.9.'da tanelerin daha eş eksenli olduğu ve perlitik yapının mikroyapıda homojen dağıldığı gözlenmiştir. 15 ppm bor içeren malzemede TiN'lere daha az oranda raslanmıştır. Bunun nedeninin mevcut titanyum miktarının ilk numunelere göre daha az miktarlarda olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Resim 7.10.'da Ç1020 çeliğinin 29 ppm oranında bor içeren malzemesinin haddelenme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı görülmektedir. Resim 7.11.'de ise, Ç1020 çeliğinin 29 ppm oranında bor içeren malzemesinin haddelenme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapıları görülmektedir.

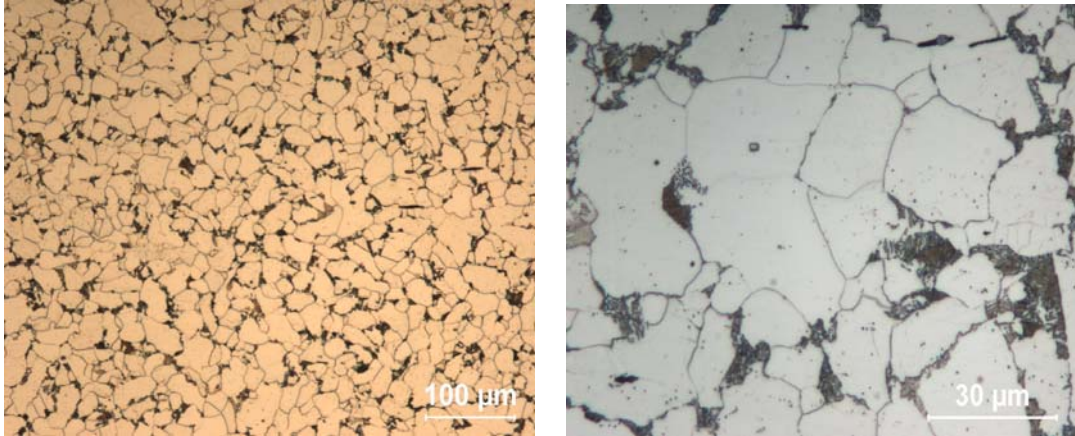


Resim 7.10. 4-2 numaralı 29 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı



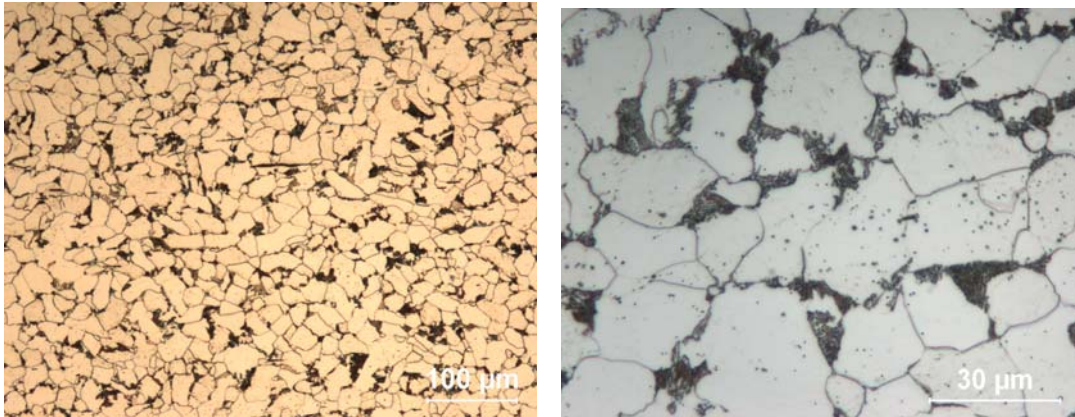
Resim 7.11. 4-2 numaralı 29 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

Resim 7.10. ve Resim 7.11.'de küçük tanelerde bulunan nokta sayılarının daha fazla olduğu görülmektedir. Perlit tanelerinin yapı içerisine daha homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca turuncu renkte dikdörtgen (TiN olan) parçacıkların daha az olduğu görülmektedir. Şekil 7.11. de ok ile gösterilen küçük noktalarda çok belirgin bir artış olduğu görülmektedir.



Resim 7.12. 5 numaralı 42 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

Resim 7.12.'de Ç1020 çeliğinin 42 ppm oranında bor içeren malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı görülmektedir. Resim 7.13.'de ise, Ç1020 çeliğinin 42 ppm oranında bor içeren malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapıları görülmektedir.

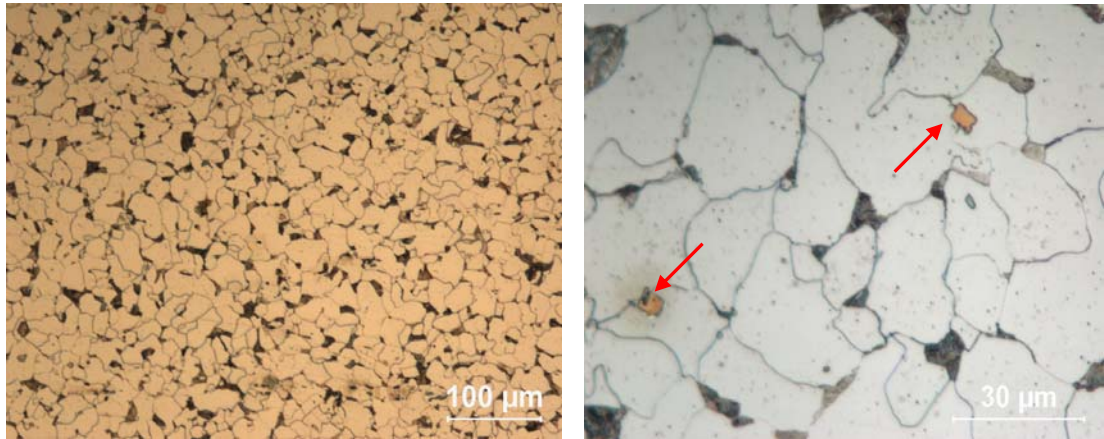


Resim 7.13. 5 numaralı 42 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

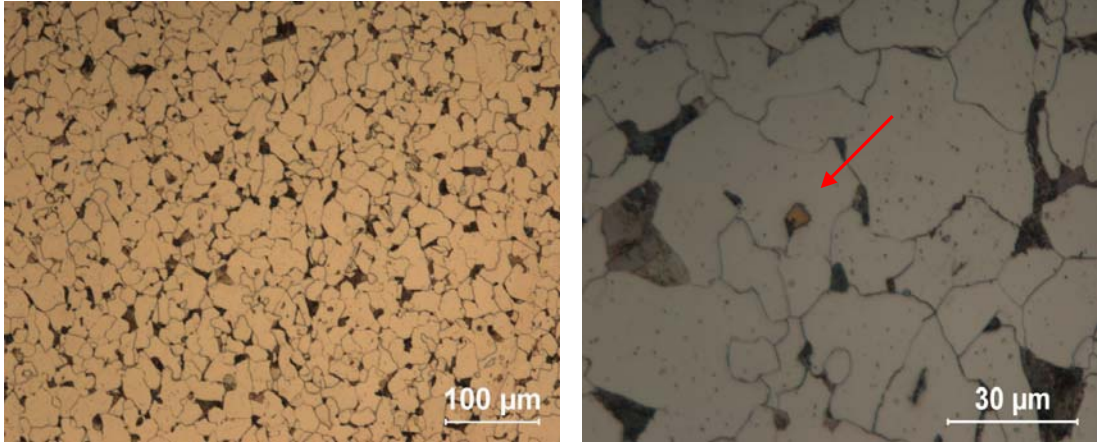
1. döküm numunelerin değişik oranda bor içeren malzemelerin hadde yönüne dik ve paralel olarak numunelerinin mikroyapı fotoğraflarından ASTM tane numarası hesaplanmış ve tamamında ASTM numarası 5 olarak gözlenmiştir. Faz oranlarında ise ferrit fazı oranı % 85 - 88 arasında, perlit oranı ise % 12 -15 arasında değişmektedir. 1. döküm işleminde bor oranı artmasıyla birlikte 0,1 – 2 µm boyutlarında siyah noktaların arttığı gözlenmiştir. 1 ppm bor içeren malzemedde siyah

noktalarda BN görülmemektedir. Fakat bor oranı arttıkça siyah nokta oranı artmış ve bu noktaların kısmen BN (Bor Nitrür) olduğu yapılan EPMA incelemesi sonucu anlaşılmıştır. Dökümün vakumsuz olması nedeniyle havadan malzemeye azot karışmıştır. Bu durum yapılan kimyasal analizler sonucu görülmektedir(Çizelge 6.10). Artan bor oranıyla birlikte azot ile bor birleşmiş ve BN oluşturmuştur. Aynı zamanda azot titanyumla da birleşerek turuncu renkli köşeli TiN (Titanyum Nitrür) parçacıkları oluşturduğu yapılan SEM incelemesi sonucu anlaşılmıştır. Oluşan TiN parçacıklarının boyutları 1 – 4 μm arasındadır.

İkinci döküm işleminden elde edilen Ç1020 çeliğinin Resim 7.14.'de 10 ppm oranında bor içeren malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı görülmektedir. Resim 7.15.'de ise, Ç1020 çeliğinin 10 ppm oranında bor içeren malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapıları görülmektedir.

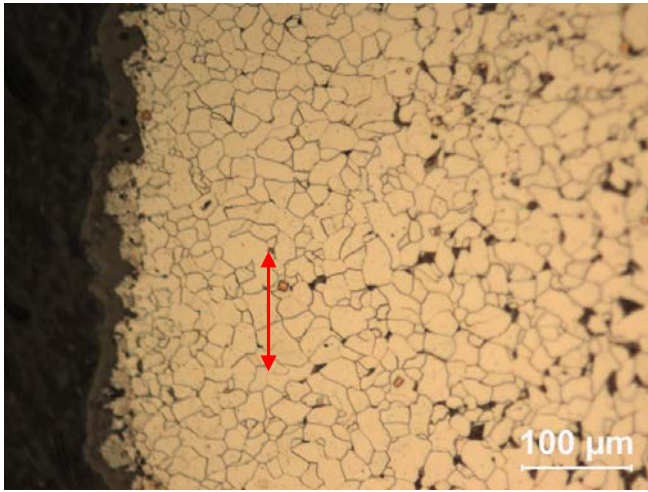


Resim 7.14. 6 numaralı 10 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı



Resim 7.15. 6 numaralı 10 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmelerdeki mikroyapısı

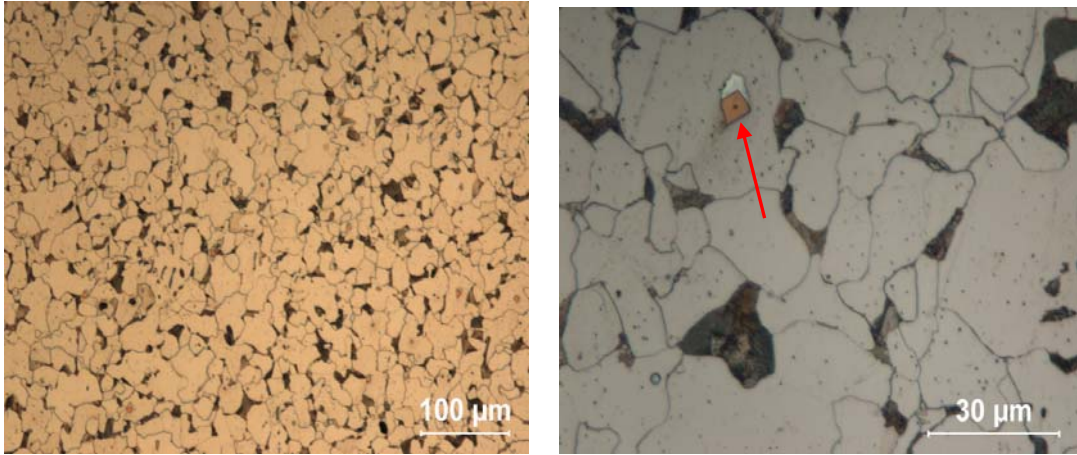
İkinci dökümde alüminyum ve titanyum miktarı, birinci döküme göre çok fazla bulunmaktadır. Bundan dolayı Resim 7.14. ve 7.15.'de ok ile gösterilen TiN'lerin daha yoğun ve boyutlarının daha büyük olduğu gözlenmiştir.



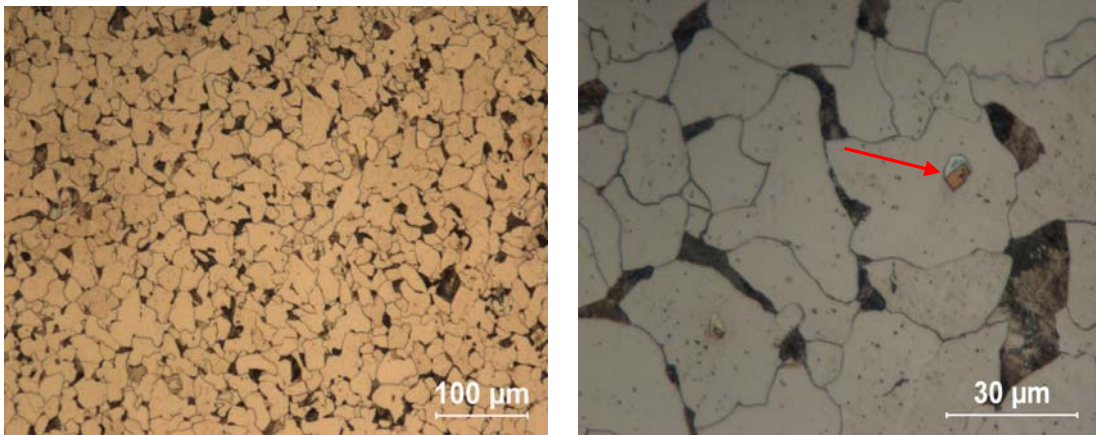
Resim 7.16. 6 numaralı 10 ppm bor içeren Ç1020 çeliğinin kenar bölgelerinden alınmış mikroyapısı fotoğrafları

Resim 7.16.'da 6 numaralı 10 ppm oranında bor içeren Ç1020 çeliğinin kenar bölgelerinden alınmış mikroyapı fotoğraflarında çift yönlü ok ile gösterilen kısımlarda ikinci döküm numunelerin genelinde kenar bölgelerinde dekarburizasyon olduğu görülmektedir. Dekarburizasyon, karbonun tamamen yanmasından

kaynaklanmakta olup malzemenin dayanımını düşürmesinden dolayı malzemede arzu edilmemektedir.

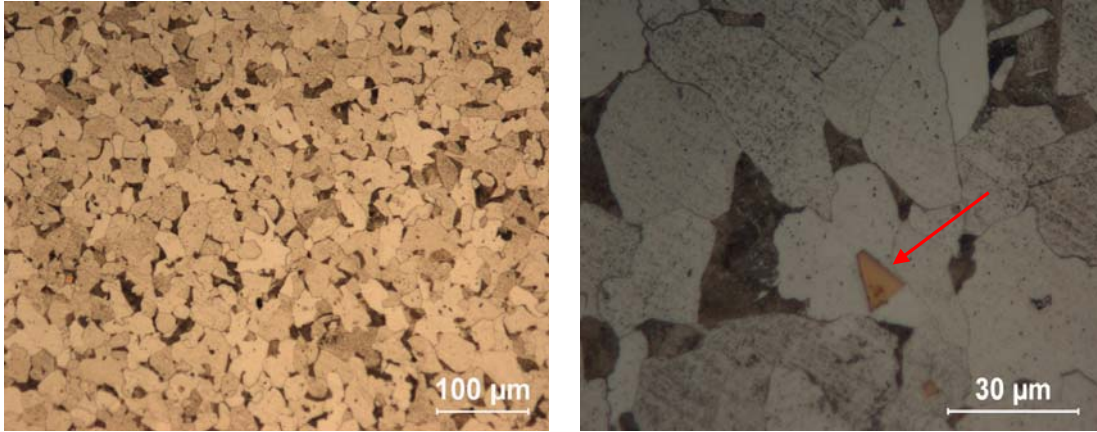


Resim 7.17. 7 numaralı 17 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

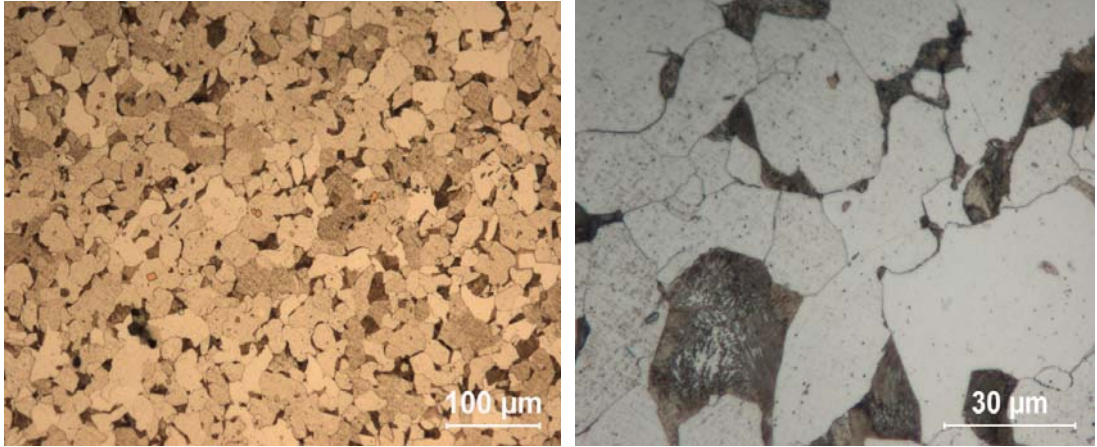


Resim 7.18. 7 numaralı 17 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

Resim 7.17.'de 7 numaralı 17 ppm bor içeren Ç1020 çeliğinin haddeme yönüne dik olarak çekilmiş farklı büyütmedeki mikroyapısı görülmektedir. Resim 7.18.'de 7 numaralı 17 ppm bor içeren Ç1020 çeliğinin haddeme yönüne paralel olarak çekilmiş farklı büyütmedeki mikroyapısı görülmektedir.



Resim 7.19. 8 numaralı 19 ppm oranında bor içeren malzemesinin Ç1020 haddeme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

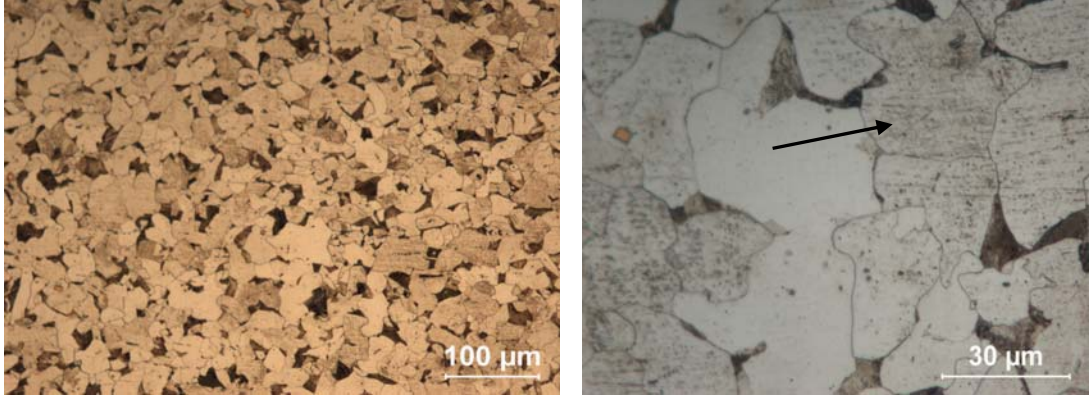


Resim 7.20. 8 numaralı 19 ppm oranında bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

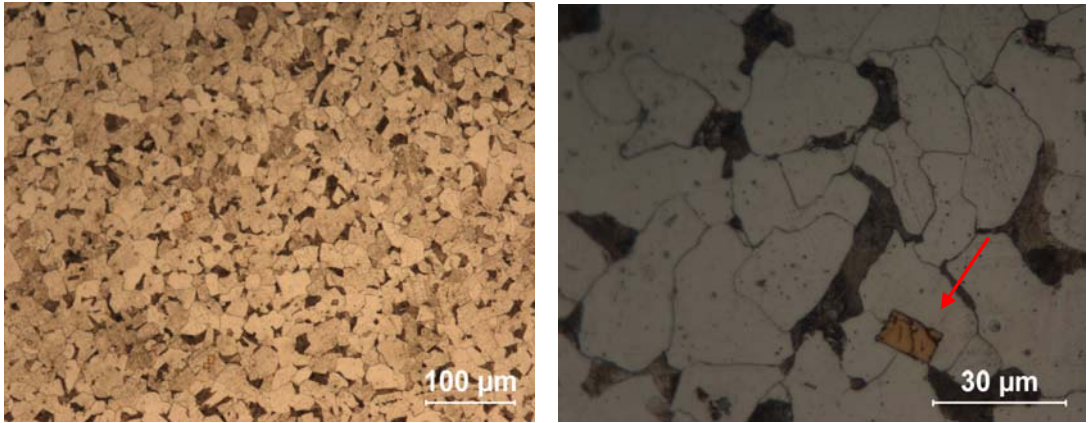
Resim 7.19.'da 8 numaralı 19 ppm oranında bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı verilmiştir. Resim 7.20.'de ise, 8 numaralı 19 ppm oranında bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı verilmiştir. Resim 7.19.'da ok ile gösterilen turuncu renkte titanyum nitürlerin daha belirgin olduğu görülmektedir. Tane boyutlarında herhangi bir farklılık görülmemektedir.

Resim 7.21.'de 9 numaralı 23 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı verilmiştir. Resim 7.22.'de ise, 9

numaralı 23 ppm oranında bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı verilmiştir.



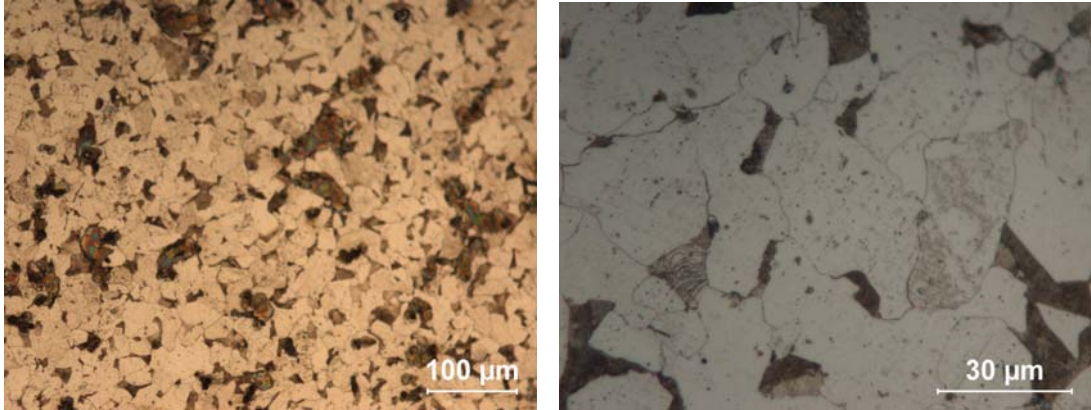
Resim 7.21. 9 numaralı 23 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı



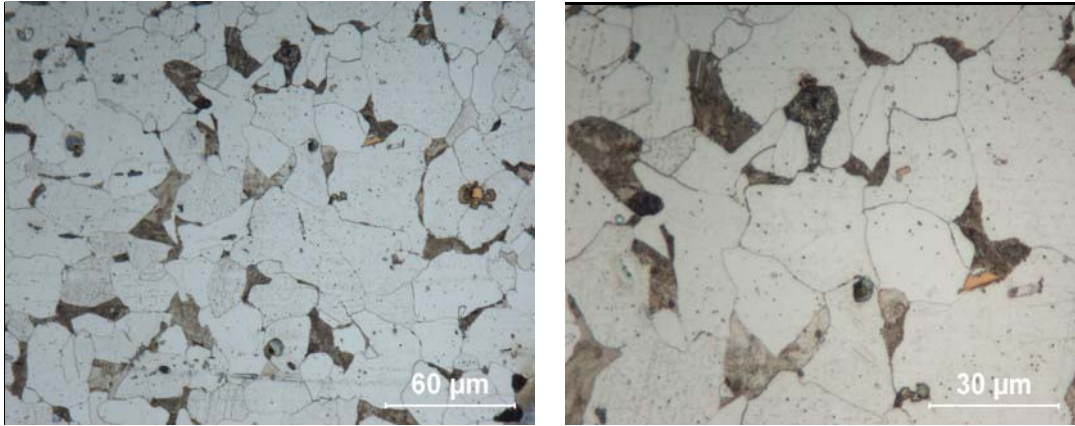
Resim 7.22. 9 numaralı 23 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

Resim 7.22. de ok ile gösterilen turuncu renkteki titanyum nütrürlerin büyüklüğü daha belirgin görülmektedir.

Resim 7.23.'de 10 numaralı 32 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı verilmiştir. Resim 7.24.'de ise, 10 numaralı 32 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı verilmiştir.

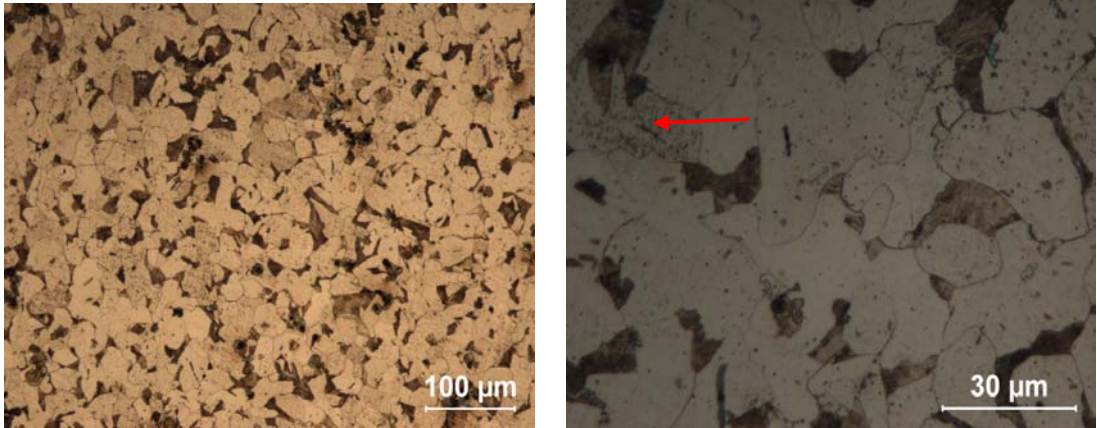


Resim 7.23. 10 numaralı 32 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

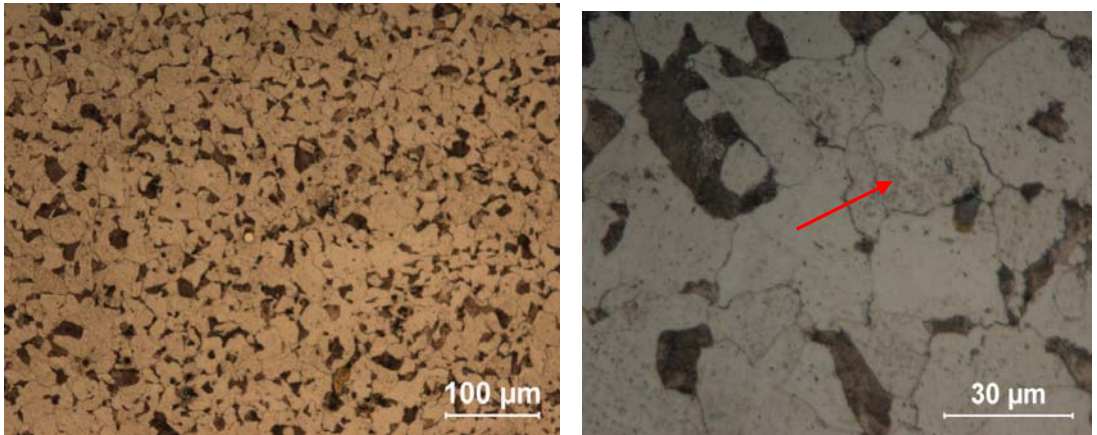


Resim 7.24. 10 numaralı 32 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

Resim 7.25.'de 11 numaralı 42 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı verilmiştir. Resim 7.26.'da ise, 11 numaralı 42 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı verilmiştir.

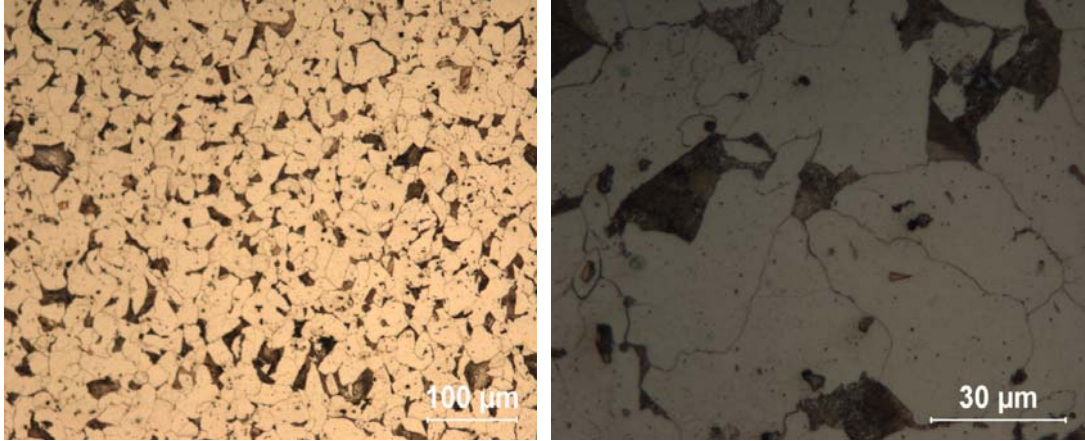


Resim 7.25. 11 numaralı 42 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

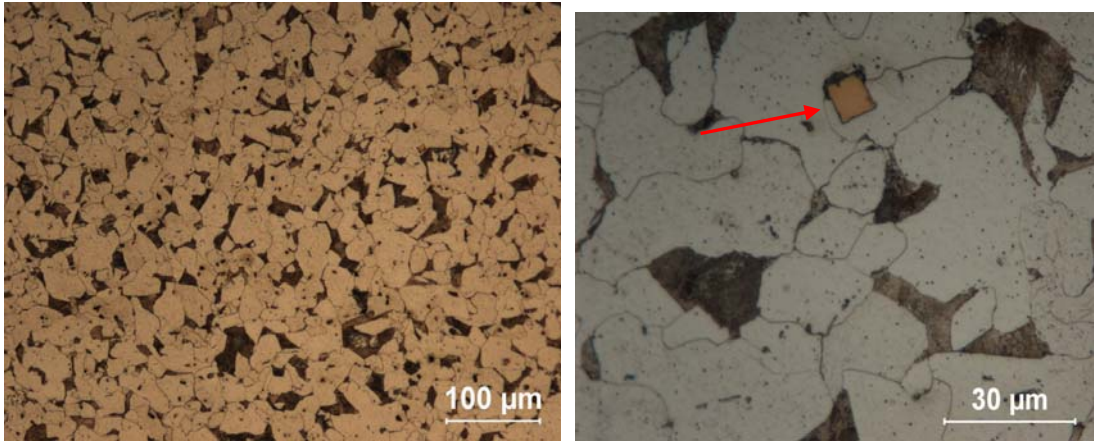


Resim 7.26. 11 numaralı 42 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

Resim 7.27. de 12 numaralı 49 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı verilmiştir. Resim 7.28.'de ise, 12 numaralı 49 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı verilmiştir.



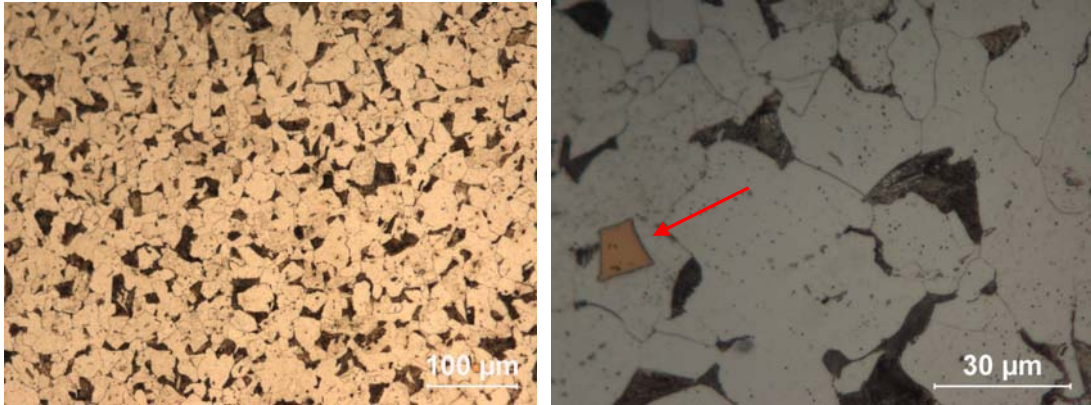
Resim 7.27. 12 numaralı 49 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı



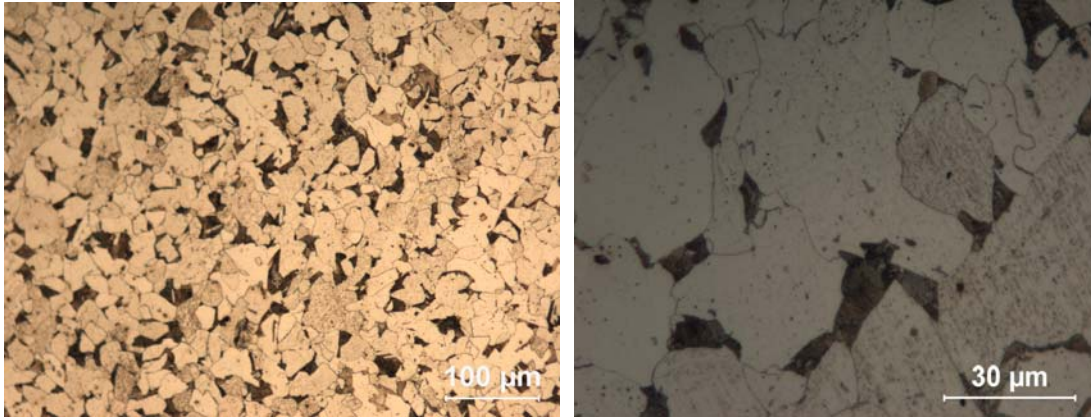
Resim 7.28. 12 numaralı 49 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı

Resim 7.28.'de ok ile gösterilen TiN çökeleği belirgin bir şekilde görülmektedir ve boyutları 10 µm civarındadır. Ayrıca siyah noktaların tane içerisinde heterojen olarak dağıldığı görülmektedir.

Resim 7.29.'da 13 numaralı 63 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı verilmiştir. Resim 7.30.'da ise, 13 numaralı 63 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmedeki mikroyapısı verilmiştir.



Şekil 7.29. 13 numaralı 63 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak farklı büyütmadaki mikroyapısı

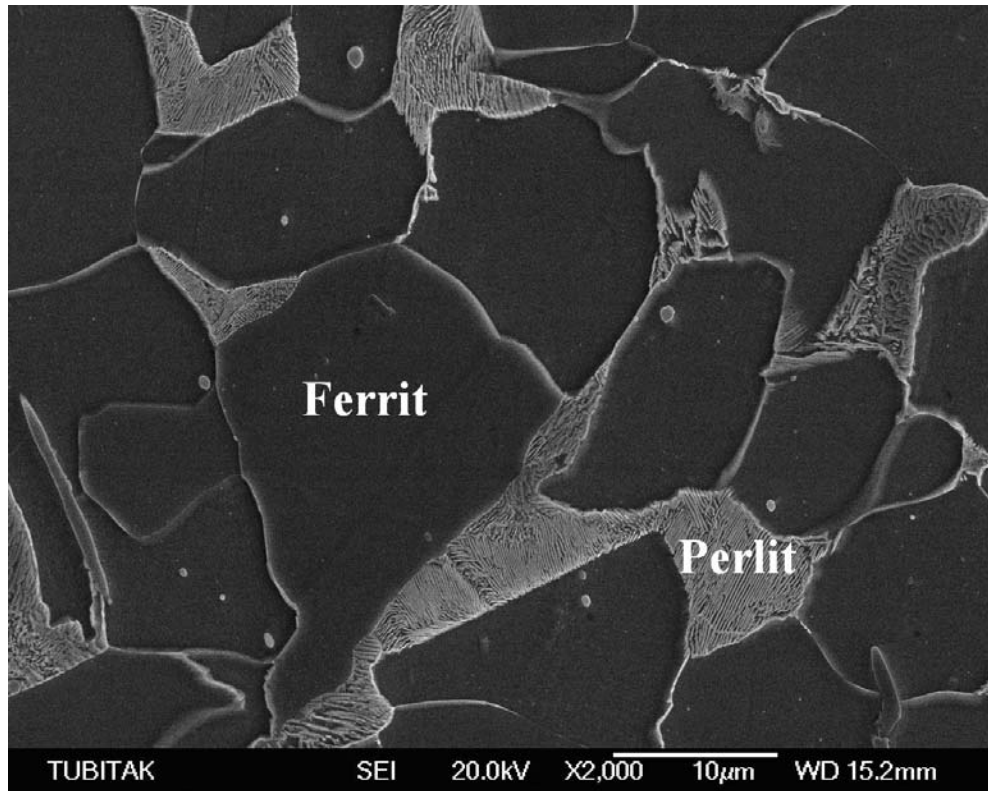


Şekil 7.30 13 numaralı 63 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne paralel olarak farklı büyütmadaki mikroyapısı

İkinci döküm numunelerinin optik mikroskop ile çekilen mikroyapı fotoğrafları birinci döküm numunelerinin optik mikroskop ile çekilen mikroyapı fotoğraflarından farklı olarak turuncu renkteki köşeli titanyum nitrürlerin daha fazla miktarda ve daha büyük ($10 - 12 \mu\text{m}$) olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni, ikinci dökümdeki titanyum miktarının birinci dökümden yaklaşık olarak 3 ila 4 kat daha fazla olması ve mevcut miktarın sabit kalması için sürekli titanyum takviye edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Birinci döküm numunelerin tane boyutu ve faz oranları açısından ikinci dökümde belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. ASTM numarası ise ikinci döküm numunelerde de 5 olarak tesbit edilmiştir.

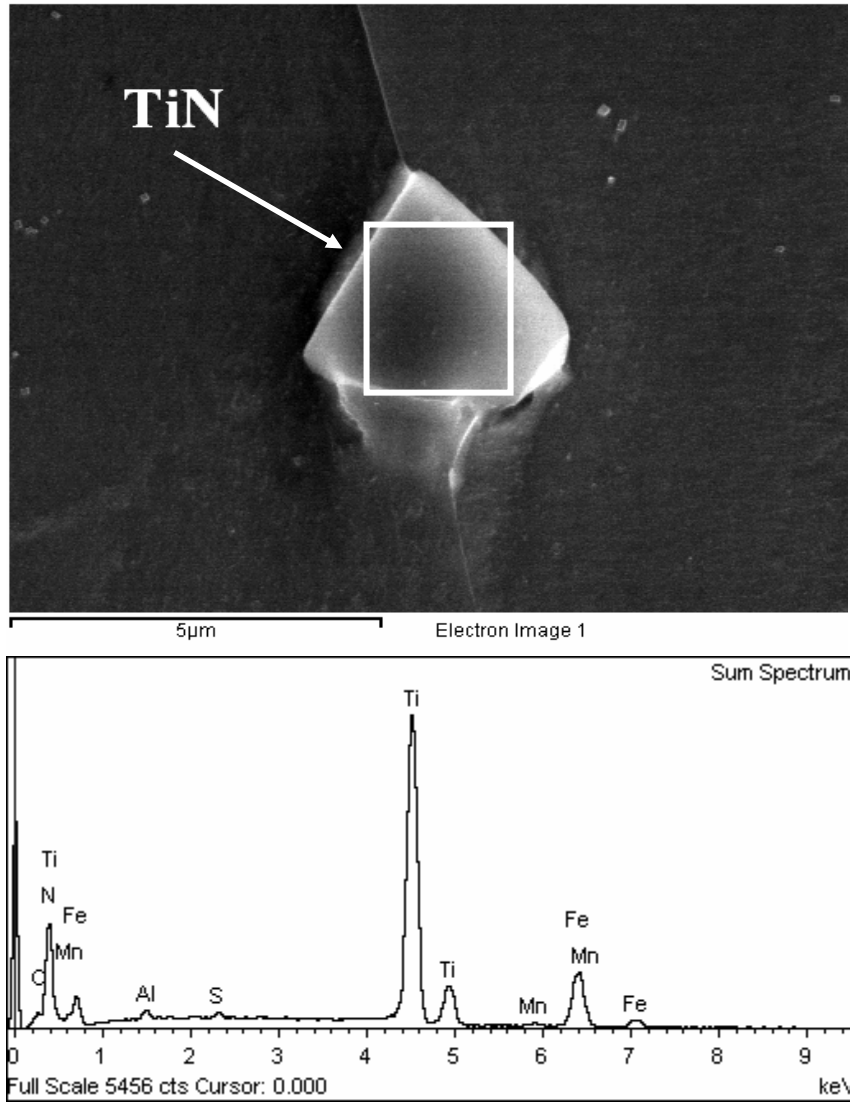
7.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri

SEM incelemesinde İkincil Elektron Yöntemi kullanılarak mikroyapılar elde edilmiştir. SEM incelemesi sırasında elde edilen mikroyapı görüntüleri Resim 7.31.de verilmiştir. Resim 7.31.de beyaz ile görülen bölgeler perlit yapı, siyah ile görülen bölgeler ferrit fazıdır.



Resim 7.31. Borsuz Ç1020 çeliğinin SEM incelemesi sonucu elde edilen ferrit fazı ve perlit yapının dağılımını gösteren mikroyapı fotoğrafı.

Bor içermeyen Ç1020 çeliğine de optimum bor oranı belirlemek için titanyum ve alüminyum ilave edilmiştir. Bu da boru azottan korumak için ilave edilen titanyumun azotla birleşerek borsuz ve borlu malzemelerde TiN (Titanyum Nitrür) oluşturduğu gözlenmiştir. Resim 7.32. de ilave edilen titanyum, malzeme içerisinde azotla birleşerek 1. dökümde 1 ila 4 µm arasında değişik büyüklüklerde TiN (Titanyum Nitrür) oluşturduğu yapılan SEM incelemesi sonucu görülmüştür(Çizelge 7.1.). TiN'ler tane sınırları ve tane içlerinde heterojen olarak dağıldığı gözlenmiştir.



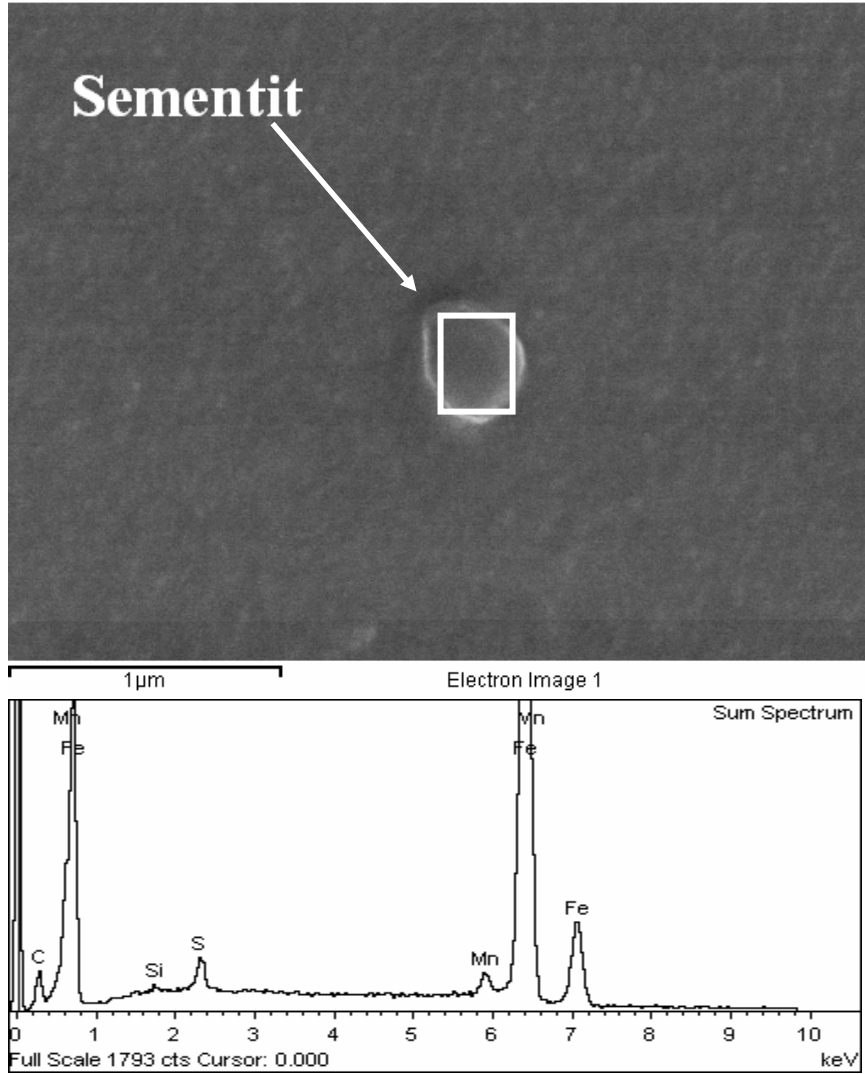
Resim 7.32. 1-1 numaralı borsuz Ç1020 malzemesinin haddeme yönüne dik olarak alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafı ve enerji ayırmalı kimyasal analiz grafiği.

Çizelge 7. 1. 1-1 numaralı borsuz Ç1020 malzemesinden alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafında belirtilen şeklin analizi.

Element	C	Al	N	Ti	Mn	Fe
% Ağırlık	2.67	0.79	27.32	49.88	0.75	18.12
% Atomik	6.17	0.81	54.24	28.96	0.38	9.03

Çizelge 7.1. de verilen değerlerde titanyum 49,88 oranında ve azot 27,32 oranında mevcut olduğu görülmüştür. Bundan dolayı Resim 7.32. de verilen köşegenli şeklin titanyum nitrür olduğu düşünülmüştür.

Resim 7.33. de 15 ppm bor içeren Ç1020 çeliğinde ve diğer numunelerde görülen 0.2 ila 1 μm arasında değişik büyüklüklerde küresel parçacıklar görülmüştür. Bu küresel parçacıklar tane içlerine düzensiz olarak farklı boyutlarda dağıldığı gözlenmiştir.

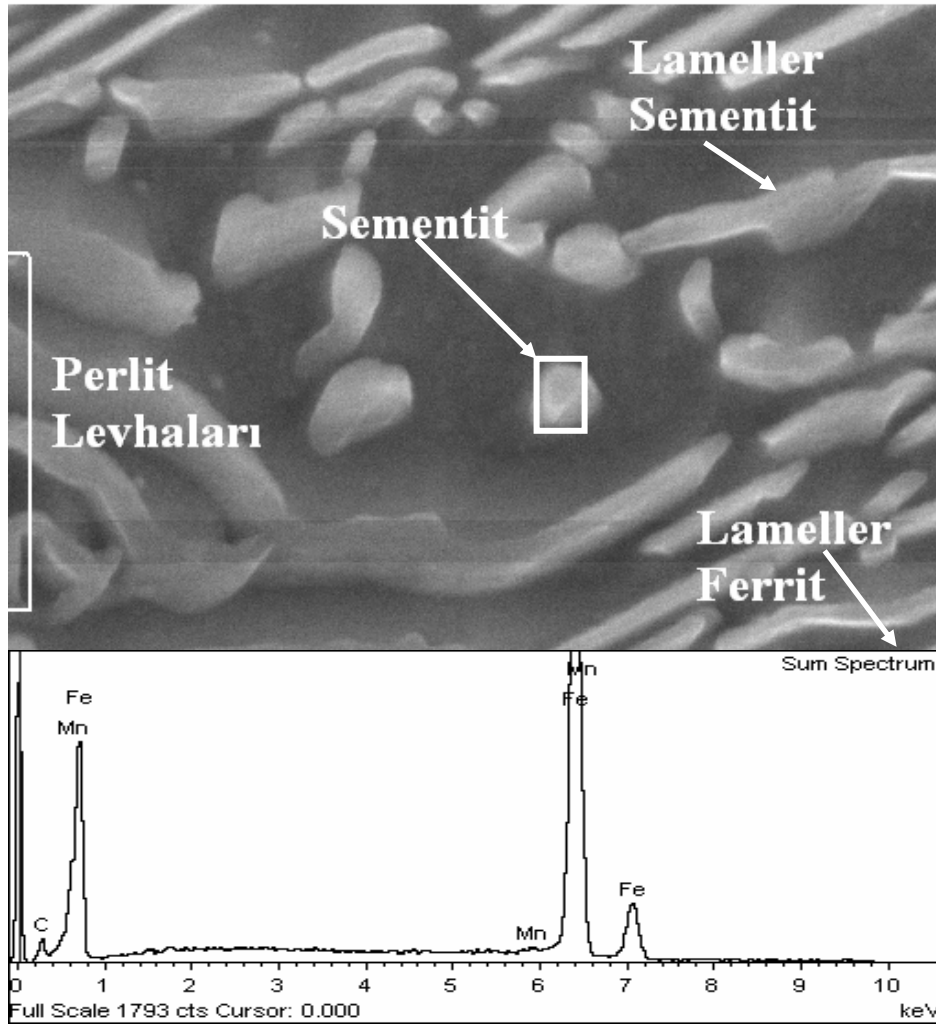


Resim. 7.33. 3-1 numaralı 15 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafı ve enerji ayırmalı kimyasal analiz grafiği.

Resim 7.33. de verilen küresel noktanın kimyasal içeriği SEM ile yapılan nokta analizi sonucu Çizelge 7.2 de verilmiştir. Yapılan SEM incelemesi sonucu bu küresel parçacıkların sementit parçacıkları olduğu düşünülmektedir(Çizelge 7.2.).Bu tür sementit partiküllerinin zaman zaman tane içinde birden fazla olarak oluştuğu görülmüştür.

Çizelge 7.2. 3-1 numaralı 15 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinden alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafında belirtilen şeklin analizi

Element	C	Si	S	Mn	Fe
% Ağırlık	8.77	0.29	1.23	2.75	87.38
% Atomik	30.61	0.43	1.61	1.78	65.57



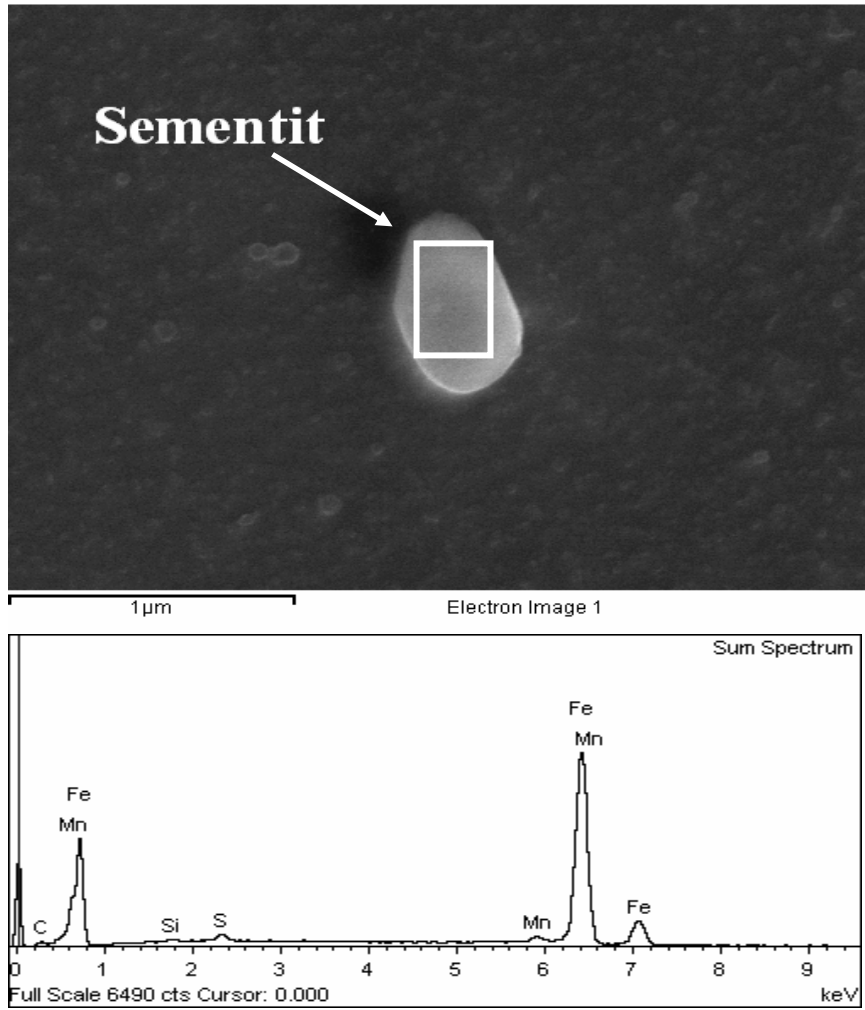
Resim. 7.34.3-1 numaralı 15 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddelenme yönüne dik olarak perlit bölgesinden alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafı ve enerji ayırmalı kimyasal analiz grafiği.

Resim 7.34. de 15 ppm bor içeren numunenin perlit bölgesinden yapılan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Belirtilen bölgede SEM ile yapılan noktasal analiz sonucunda sementit parçacığı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca beyaz sütunların Fe_3C lamelleri olduğu görülmüştür. Çizelge 7.3. de belirtilen alandan yapılan noktasal analizin kimyasal içeriği verilmektedir.

Çizelge 7. 3. 3-1 numaralı 15 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinden perlit bölgesinden alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafında belirtilen şeklin analizi

Element	C	Mn	Fe
% Ağırlık	7.24	0.63	92.13
% Atomik	26.63	0.51	72.86

Resim 7.35. de ferrit bölgesinden SEM incelemesi ile elde edilen mikroyapı fotoğrafı verilmektedir. Küresel nokta boyutları 1 μm civarındadır. SEM ile belirtilen küresel parçacıktan alınan analiz sonucu Çizelge 7.4. de verilmiştir.



Resim. 7.35.4-2 numaralı 29 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddelme yönüne dik olarak perlit bölgesinden alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafı ve enerji ayırmalı kimyasal analiz grafiği.

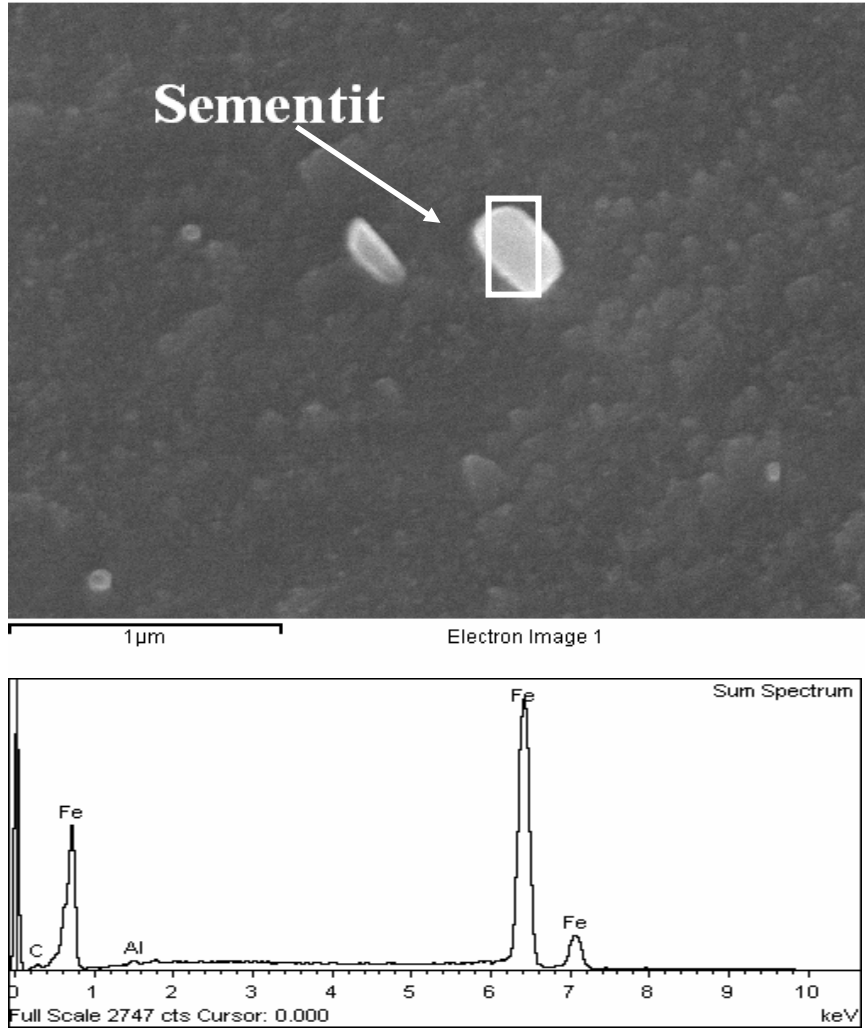
Yapılan analiz sonucunda küresel parçacığın sementit olduğu görülmüştür. Üretilen bütün borlu çelik içerisinde bulunan bu küresel parçacıkların farklı boyutlarda ve yapı içerisinde homojen olmadığı gözlenmiştir.

Çizelge 7. 4. 4-2 numaralı 29 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinden alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafında belirtilen şeklin analizi.

Element	C	Si	S	Mn	Fe
% Ağırlık	3.25	0.34	0.85	1.95	93.62
% Atomik	13.38	0.61	1.31	1.75	82.95

Ç1020 çeliğine değişik oranlarda ilave edilen bor oranlarından birinci dökümden 1-1 nolu 1 ppm, 3-1 15 ppm ve 4-2 29 ppm bor içeren malzemelerin SEM ile tane içerisinde ve sınırlarında görülen küresel ve köşegenli şekillerin içeriği incelenmiştir. İnceleme sonucunda ilave edilen titanyum, azotla birleşerek 1 ila 4 μm arasında değişik büyüklüklerde TiN oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca tane içerisinde heterojen bir şekilde dağıldığı gözlenen 0.1 ila 2 μm boyutlarındaki noktasal şekillerin sementit parçacıkları olduğu gözlenmiştir. SEM ile yapılan incelemede SEM cihazımızda WDS olmaması ve mevcut SEM cihazımızda EDS'in olması nedeniyle ppm mertebesinde bor tesbit edilememiştir.

İkinci döküm numunelerinden sadece 7 nolu 19 ppm bor içeren numunenin SEM incelemesi yapılmıştır. Resim 7.36. da belirtilen 0.5 μm boyutunda küresel parçacığın SEM ile noktasal analizi yapılmıştır(Çizelge 7.5).



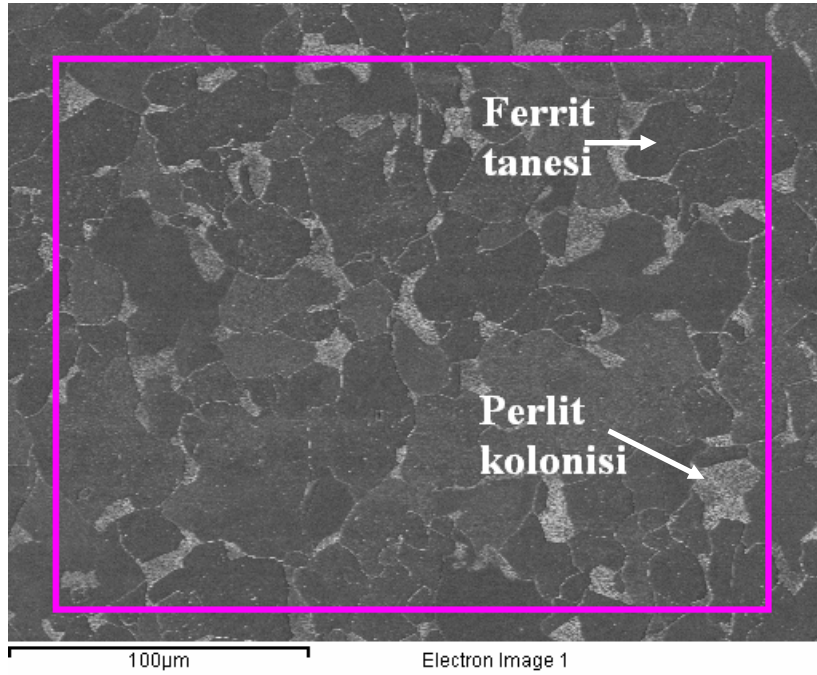
Resim. 7.36. 7 numaralı 19 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin haddeleme yönüne dik olarak alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafı ve enerji ayırmalı kimyasal analiz grafiği.

Çizelge 7.5. verilen analiz sonucunda ikinci döküm numunelerinde de görülen 0.1 ila 2 µm arasında farklı boyutlarda küresel parçacıkların sementit olduğu gözlenmiştir. İkinci döküm numunelerinde yapılan SEM incelemelerinde turuncu renkte köşegenli TiN parçacıklarının olduğu ve boyutlarının ise I. döküme nazaran daha büyük olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 7.5. 7 numaralı 19 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinden alınan SEM incelemesi sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafında belirtilen şeklin analizi

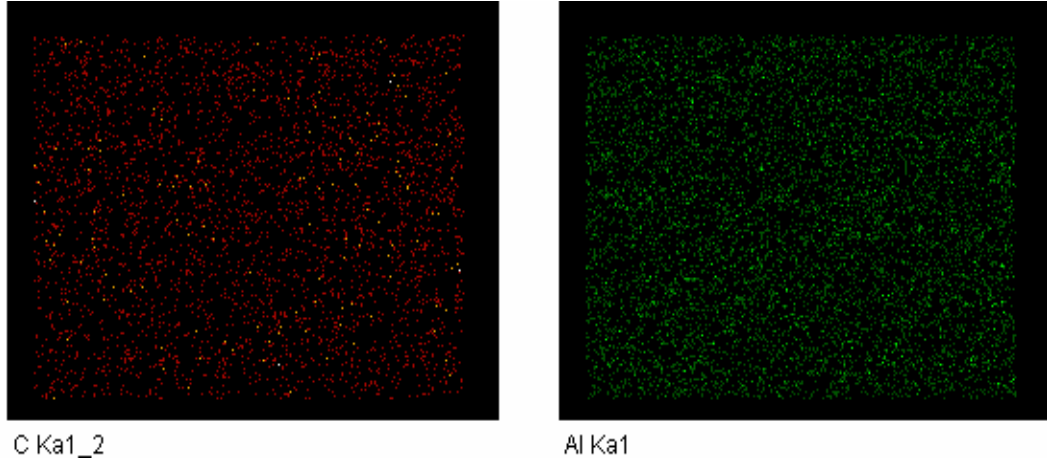
Element	C	Al	Fe
% Ağırlık	2.74	0.54	96.72
% Atomik	11.52	1.00	87.47

Ayrıca Resim 7.37. de verilen ikinci döküm numunelerinden 7 nolu 19 ppm bor içeren Ç1020 çeliğinin SEM ile element haritalama yapılan bölge görülmektedir.

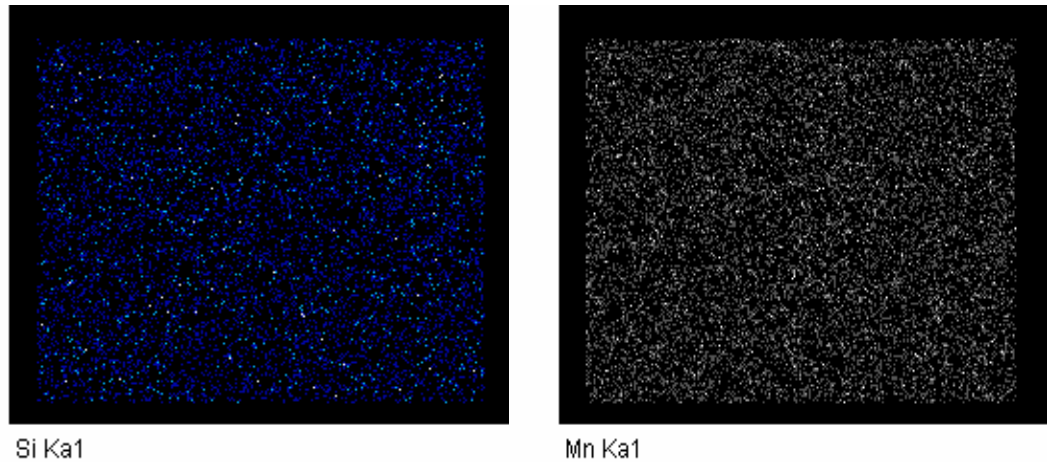


Resim. 7.37. 7 numaralı 19 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin SEM ile element haritalama yapılan bölge fotoğrafı.

Ayrıca Al, Ti, N ve C elementlerinin bor ile veya kendileriyle bileşik oluşturmaları nedeniyle bor içeren çeliklerin tane içerisindeki dağılımının ne durumda olduğu önemlidir. Resim 7.38. de SEM ile yapılan element haritalama sonucu karbon ve alüminyumun dağılımı görülmektedir. Karbon ve alüminyumun homojen olarak dağıldığı gözlenmiştir.



Resim. 7.38. 7 numaralı 19 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin SEM ile yapılan element haritalama sonucu karbon ve alüminyumun dağılımı.



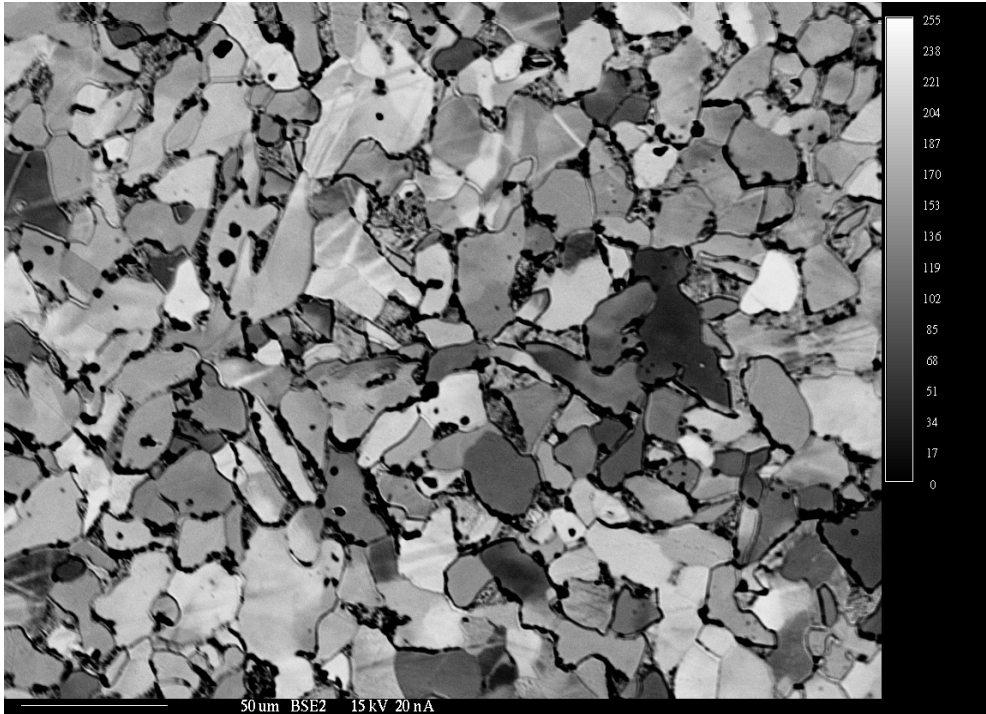
Resim. 7.39. 7 numaralı 19 ppm bor içeren Ç1020 malzemesinin SEM ile yapılan element haritalama sonucu silisyum ve manganın dağılımı.

Resim 7.39. de SEM ile yapılan element haritalama sonucu silisyum ve manganın dağılımı görülmektedir. Silisyum ve manganın homojen olarak dağıldığı gözlenirken, Resim 7.37. de belirtilen bölgeden SEM ile yapılan haritalama sonucu bor tesbit edilememiştir. 1. ve 2. döküm numunelerinde SEM ile yapılan çalışmalarımız neticesinde WDS'in olmaması ve görüntülerin EDS ile alınması nedeniyle boru tesbit etmek mümkün olmamıştır.

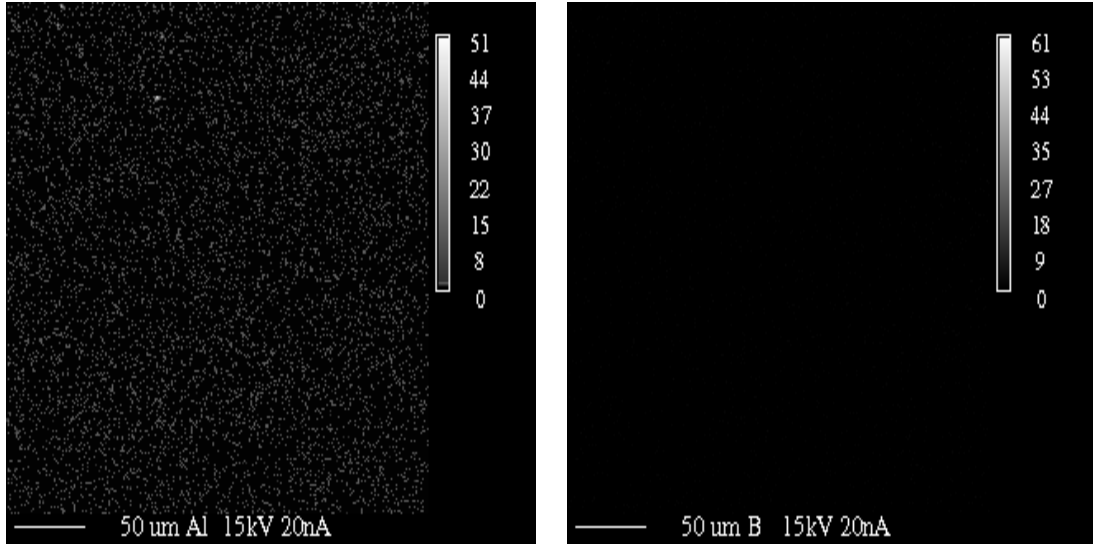
7.3. Elektron Prob Mikroanaliz (EPMA) İncelemeleri

SEM’de tesbiti mümkün olmayan bor, WDS aracılığıyla hafif elementleri de içeren geniş bir belirleme aralığı olan EMPA’da tesbit edilmiştir. EPMA, lityum, helyum ve hidrojen hariç tüm elementleri yüksek hassasiyette ölçebilmektedir. EPMA ile borun yanı sıra, alüminyum, titanyum ve azot elementleri de incelenmiştir. EPMA’nın geri saçılmış elektron görüntüsü atomik konsantrasyon bilgisi vermektedir.

Resim 7.40 da 1-1 nolu borsuz numunenin EPMA ile geri saçılmış elektron görüntüsü formatında çekilmiş mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Bu fotoğraftan EPMA ile element haritalama yapılarak bor, alüminyum, titanyum ve azot tesbit edilmiştir.

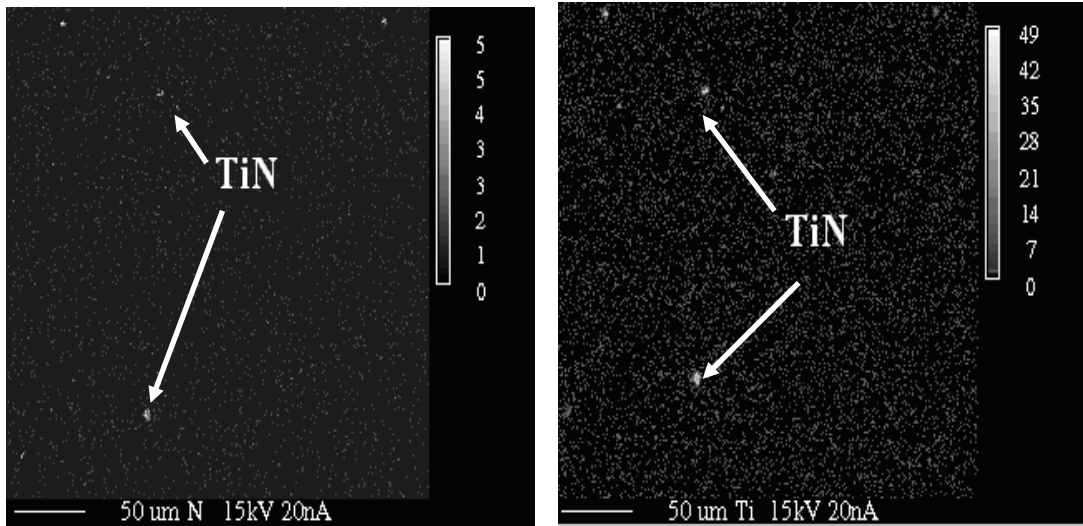


Resim 7.40. 1-1 nolu borsuz numunenin EPMA ile element haritalamanın yapıldığı bölgenin fotoğrafı.



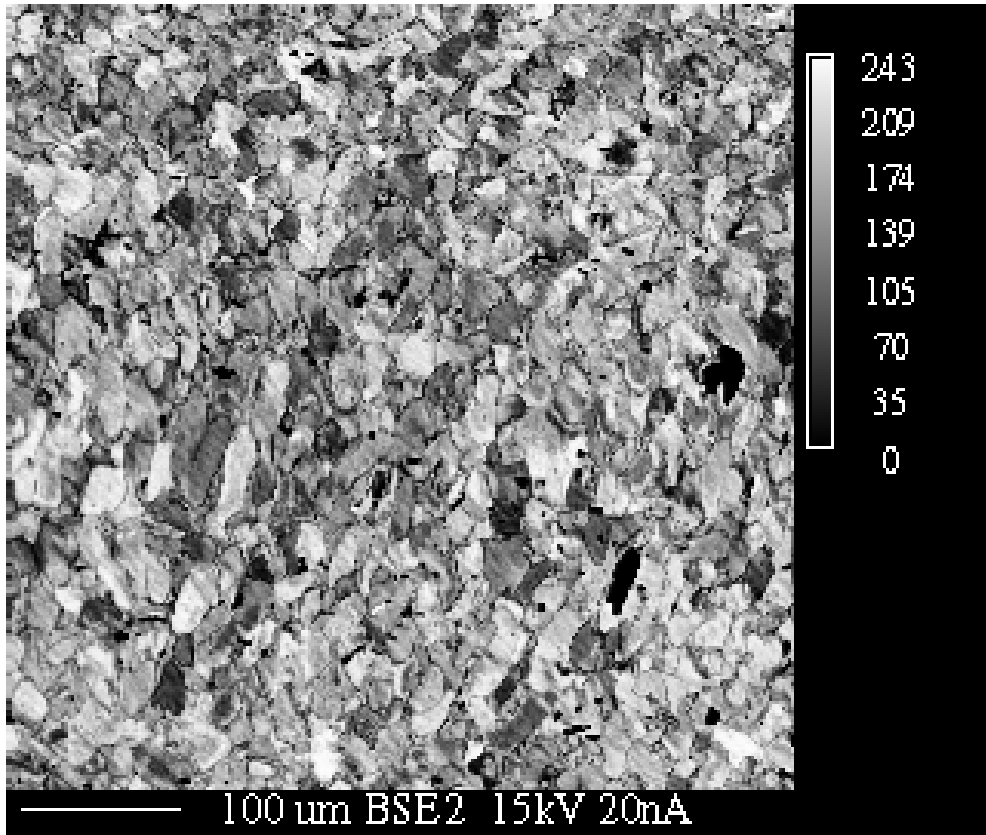
Resim 7.41. 1-1 nolu borsuz numunenin EPMA ile element haritalama sonucu alüminyum ve bor elementinin dağılımı.

Resim 7.41 de EPMA ile yapılan element haritalama sonucu alüminyum malzeme içerisinde bulunduğu ve homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Fakat bor 1 ppm veya daha düşük seviyelerde olması ve titanyum oranının yüksek olmasından dolayı azotu bağlaması ($\text{Ti} + \text{N} \rightarrow \text{TiN}$) nedeniyle 1-1 nolu malzemede bor görülmemektedir.



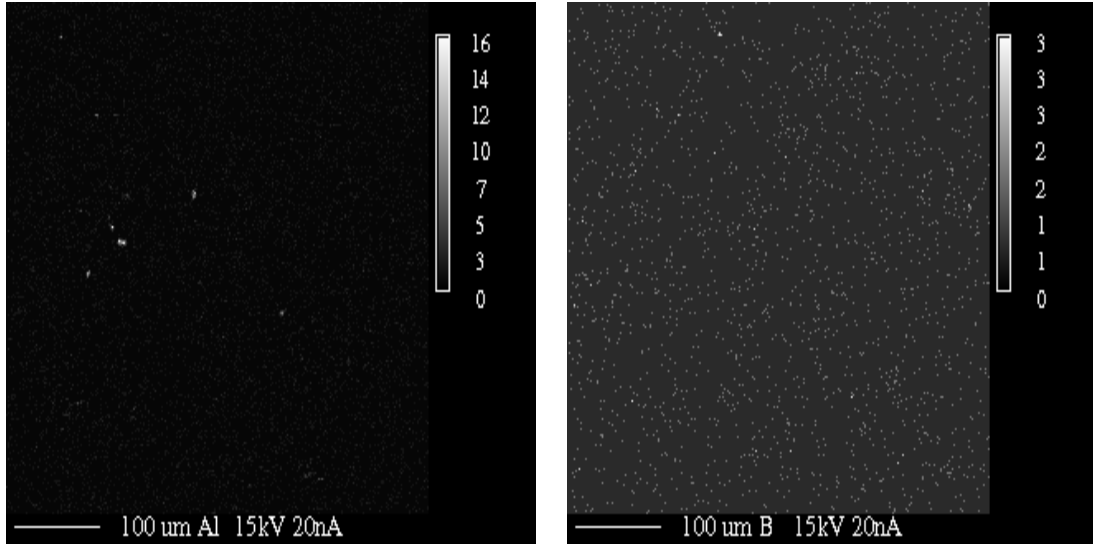
Resim 7.42. 1-1 nolu borsuz numunenin EPMA ile element haritalama sonucu azot ve titanyum elementinin dağılımı.

Resim 7.42. de azot ve titanyum elementlerinin EPMA ile haritalama sonuçları görülmektedir. Azot ve titanyumun çoğu yerde homojen olarak dağıldığı fakat bazı yerlerde ise SEM ile yapılan inceleme sonucunda TiN olarak 1 ila 4 μm arasında değişik boyutlarda parçacıklar halinde bulunduğunu Resim 7.42. de azot ile titanyumun aynı yerde yoğun olarak çıkması EPMA haritalama sonuçlarıyla da doğrulanmaktadır.



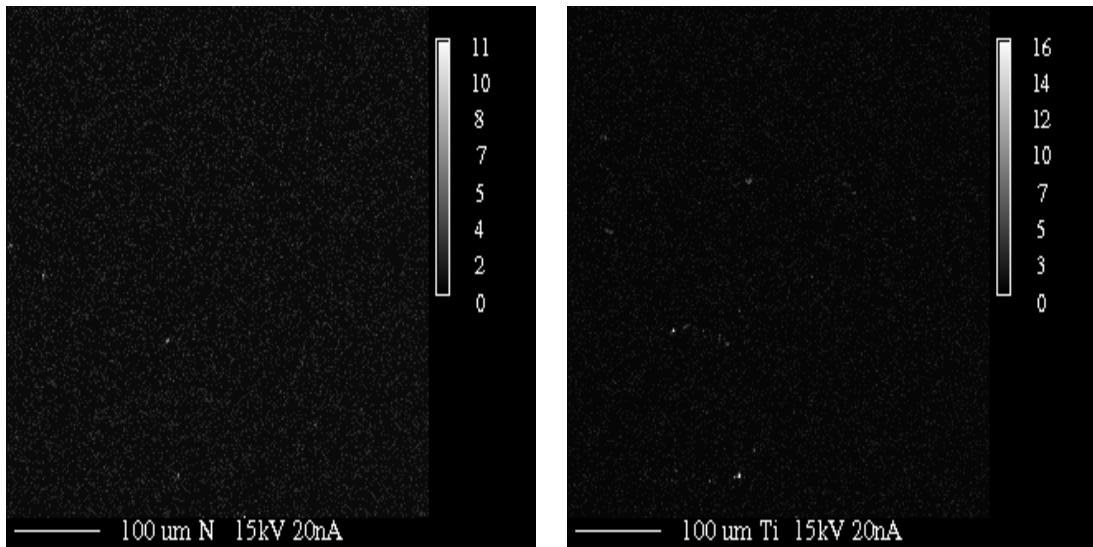
Resim 7.43. 4-1 nolu 26 ppm bor içeren numunenin EPMA ile element haritalamanın yapıldığı bölgenin fotoğrafı.

Resim 7.43. de 4-1 nolu 26 ppm bor içeren numunenin EPMA ile çekilmiş mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Bu mikroyapı fotoğrafından element haritalama yapılarak bor, alüminyum, titanyum ve azotun dağılımı gözlenmiştir.



Resim 7.44. 4-1 nolu 26 ppm bor içeren numunenin EPMA ile element haritalama sonucu alüminyum ve bor elementinin dağılımı.

Resim 7.44. de EPMA ile element haritalama sonucu alüminyum ve borun dağılımı görülmektedir. Alüminyum genelde homojen olduğu fakat bazı bölgelerde ise daha büyük parçacık halinde bulundu görülmektedir. Borun ise, homojen olarak tane içerisinde dağıldığı gözlenmektedir.



Resim 7.45. 4-1 nolu 26 ppm bor içeren numunenin EPMA ile element haritalama sonucu azot ve titanyum elementinin dağılımı.

Resim 7.45. de EPMA ile element haritalama sonucu azot ve titanyumun dağılımı görülmektedir. Azot ve titanyumun çoğu yerde homojen olarak dağıldığı fakat bazı

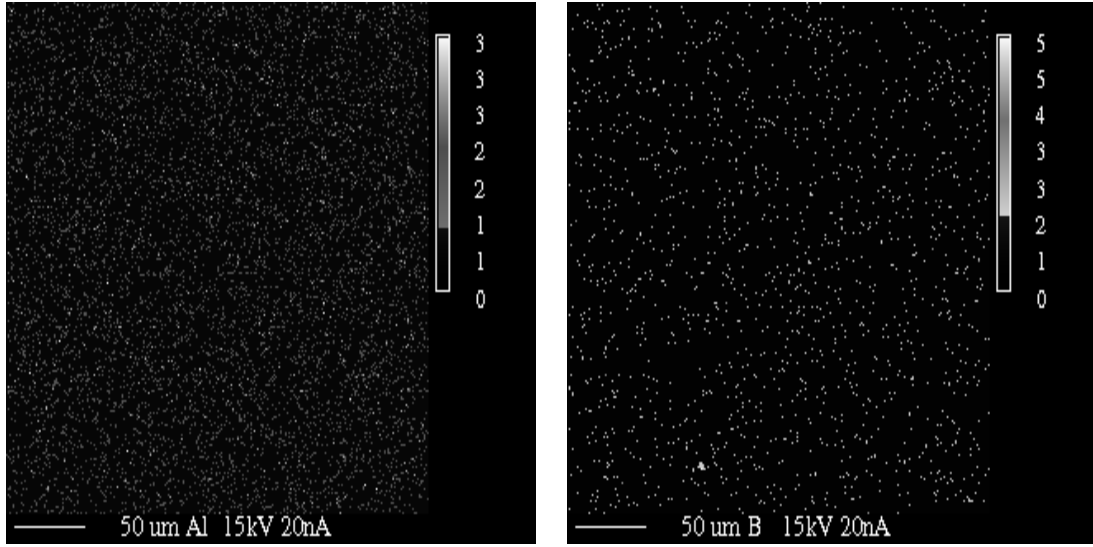
yerlerde Gebze TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü’de SEM ile yapılan inceleme sonucunda TiN olarak 1 ila 4 μm arasında değişik boyutlarda parçacıklar halinde bulunduğunu Resim 7.45. de azot ile titanyumun aynı yerde yoğun bir şekilde görülmesinden anlaşılmaktadır.

Resim 7.46. de 4-2 nolu 29 ppm bor içeren numunenin EPMA ile çekilmiş mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Bu mikroyapı fotoğrafından element haritalama yapılarak bor, alüminyum, titanyum ve azotun dağılımı gözlenmiştir.



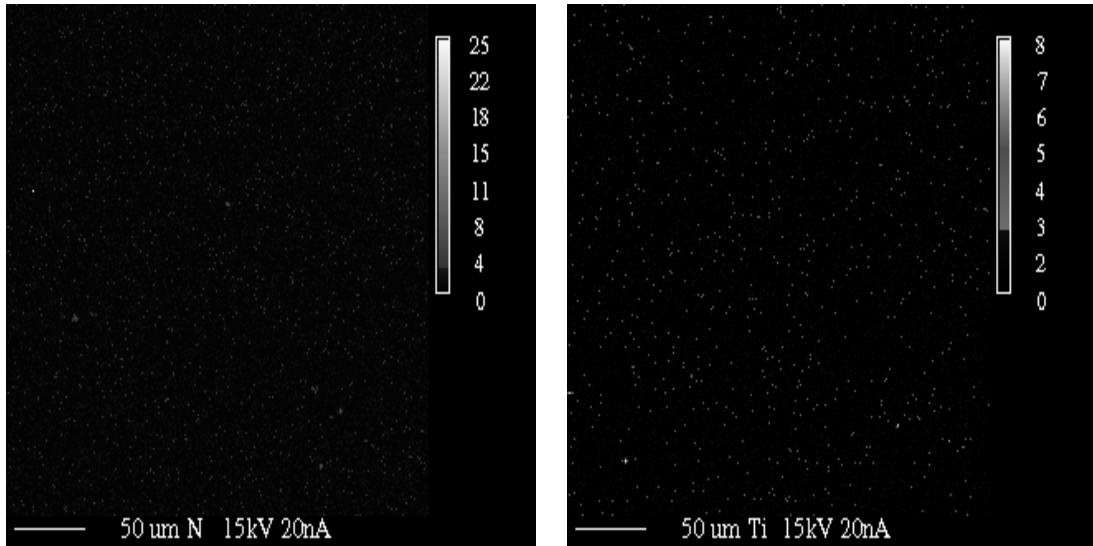
Resim 7.46. 4-2 nolu 29 ppm bor içeren numunenin EPMA ile element haritalamanın yapıldığı bölge fotoğrafı.

Resim 7.47. de EPMA ile element haritalama sonucu alüminyum ve borun dağılımı görülmektedir. Alimunyum ve borun tane içerisinde homojen olarak dağıldığı gözlenmektedir.

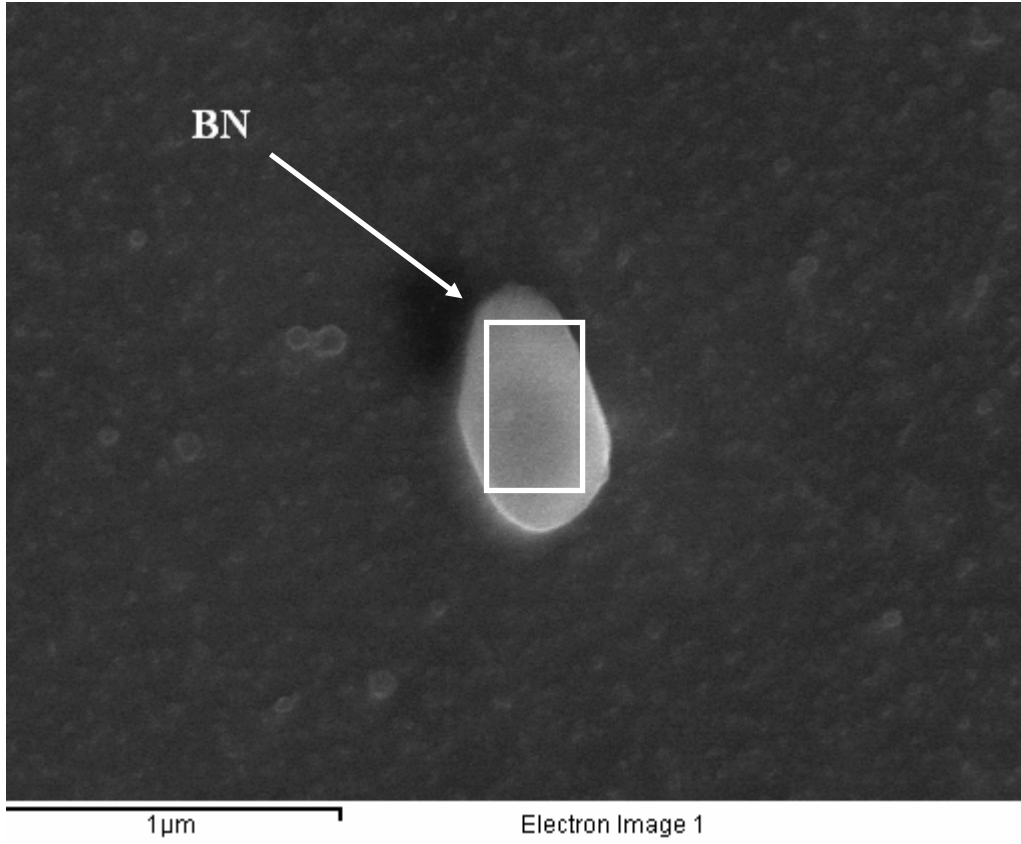


Resim 7.47. 4-2 nolu 29 ppm bor içeren numunenin EPMA ile element haritalama sonucu alüminyum ve bor elementinin dağılımı.

Resim 7.48. de EPMA ile element haritalama sonucu azot ve titanyumun dağılımı görülmektedir. Azot ve titanyumun tane içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmektedir.

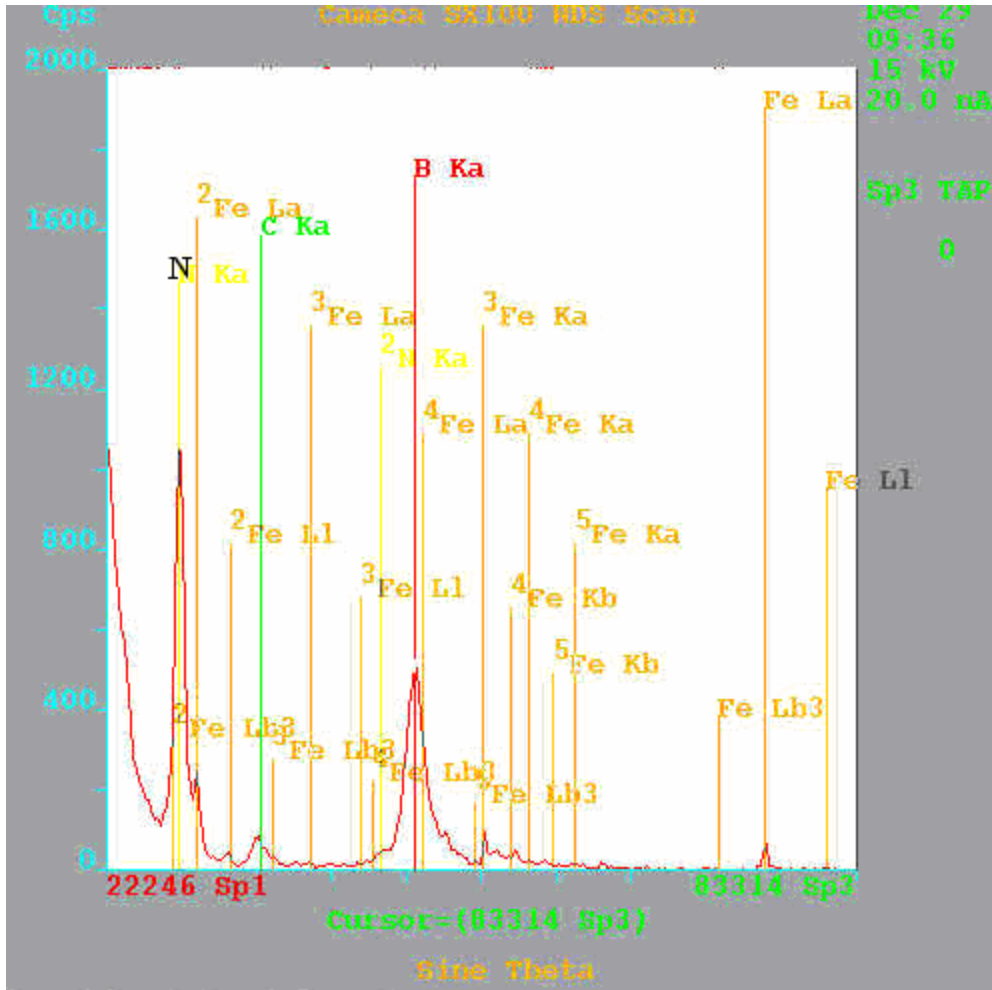


Resim 7.48. 4-2 nolu 29 ppm bor içeren numunenin EPMA ile element haritalama sonucu azot ve titanyum elementinin dağılımı.



Resim 7.49. EPMA ile yapılan nokta incelemeleri sonucunda BN oluşumu.

EPMA ile yapılan incelemeler sonucunda borun tane içerisinde homojen olarak dağıldığı tesbit edilmiştir. Ayrıca Resim 7.49. da görüldüğü gibi tane içerisinde 0.1 ila 2 μm arasında farklı boyutlarda küresel parçacıklarda yapılan noktasal analizler sonucunda Bor Nitrür (BN) olduğu gözlenmiştir. Tane içerisinde siyah küresel noktaların koyu olanlarının bor nitrür olduğu tesbit edilmiştir. Resim 7.50. de EPMA nokta analizi sonucu elde edilen bor nitrürün grafik resmi görülmektedir. Fountain, R.W. ve arkadaşları[5], demir içerisinde azotun çözünübilirliği üzerine borun etkisini incelemişler ve 950 ile 1150 °C östenitlenen malzeme ön nitrürasyona tabii tutulmadığında bor, azot ile birleşerek bor nitrür (BN) oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Döküm işleminin vakumsuz ortamda yapılmış olması BN oluşumunu artırmıştır.



Resim 7.50. EPMA ile yapılan nokta analizi sonucu elde edilen bor nitrür oluşum grafiği.

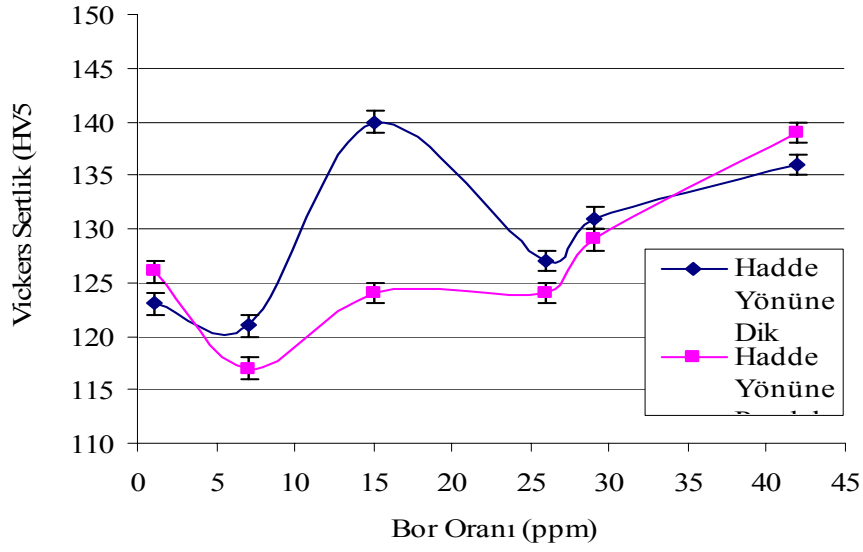
7.4. Sertlik Deney Sonuçları ve Tartışma

Sertlik değerleri, mikroyapı fotoğrafları çekilen numuneler üzerinden sıcak haddelenme yönüne dik ve paralel olmak üzere, farklı oranda bor içeren numunelerin yüzeylerinden 5 farklı bölgeden olmak üzere Vickers sertlik değerleri alınmış ve ortalamaları sonuç olarak değerlendirilmiştir. Çizelge 7.6. da hadde yönüne dik ve paralel doğrultuda birinci döküm numunelerin sertlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.6. Hadde yönüne dik ve paralel doğrultuda birinci döküm numunelerin ortalama sertlik değerleri(Ç1020 çeliği).

Malzeme No	Hadde Yönüne Dik (HV 5)	Hadde Yönüne Paralel (HV 5)	Bor Oranları (ppm)
1-1	123	126	Borsuz1
2-1	121	117	7
3-1	140	124	15
4-1	127	124	26
4-2	131	129	29
5	136	139	42

Şekil 7.1. de hadde yönüne dik doğrultudaki numunelerden alınan sertlik değerlerinde 15 ppm bor içeren Ç1020 çeliğinde yaklaşık olarak 20 HV5 değerinde sertlik artışı gözlenmiştir. Fakat başlangıçta 7 ppm bor içeren Ç1020 çeliği 3 ila 4 HV5 sertlik değeri düşmüştür. 25 ppm bor içeren Ç1020 çeliği 140 HV5 sertlik değerinden 127 HV5 sertlik değerlerine düşmüş ve daha sonra 45 ppm bor oranlarında tekrar 140 HV5 sertlik değeri seviyelerine ulaşmıştır. Hadde yönüne paralel doğrultudaki numunelerden alınan sertlik değerlerinde ise başlangıçta 7 ppm bor içeren Ç1020 çeliğinde 12 HV5 sertlik değerinde bir düşüş meydana gelmiştir. 15 ppm bor oranında başlangıçtaki değerine ulaşmış 25 ppm bor oranlarında sertlik değeri artmaya başlamıştır. Yaklaşık olarak 45 ppm bor oranlarında 140 HV5 seviyesine ulaşmıştır. Hadde yönüne paralel ve dik doğrultuda değişik bor oranlarında alınan sertlik değerlerinde artış 15 ppm bor oranında yaklaşık olarak 10 HV5 artış olsada, asıl artış 40 ppm bor oranında 15 HV5 değerinde bir artış gözlenmiştir.

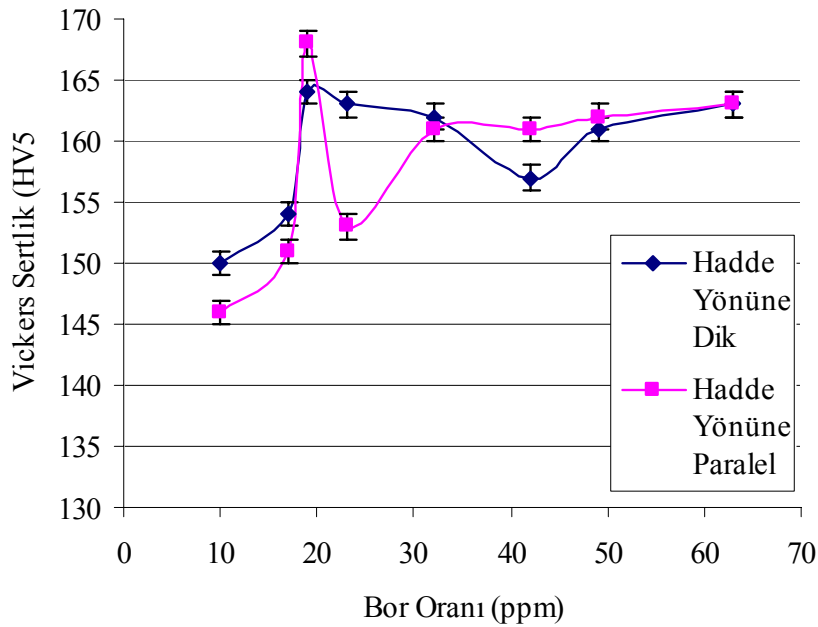


Şekil 7.1. Hadde yönüne dik ve paralel doğrultuda birinci döküm numunelerin sertlik değerleri grafiği

Çizelge 7.7. Hadde yönüne dik ve paralel doğrultuda ikinci döküm numunelerin sertlik değerleri(Ç1020 çeliği).

Malzeme No	Hadde Yönüne Dik (HV 5)	Hadde Yönüne Paralel (HV 5)	Bor Oranları (ppm)
6	150	146	10
7	154	151	17
8	164	168	19
9	163	153	23
10	162	161	32
11	157	161	42
12	161	162	49
13	163	163	63

Çizelge 7.7. da hadde yönüne dik ve paralel doğrultuda ikinci döküm numunelerin sertlik değerleri verilmiştir. Bor oranı farklı olup, alüminyum ve titanyum oranının yaklaşık olarak sabit olduğu ikinci dökümde hadde yönüne dik doğrultuda sertlik değerlerinde optimum bor oranının 20 ppm olduğu görülmektedir. 20 ppm bor oranında ikinci döküm işleminde yaklaşık olarak 15 HV5 sertliğinin arttığı görülmektedir(Şekil 7.2.). Hadde yönüne paralel yönde alınan sertlik değerlerinde optimum bor oranının 20 ppm olduğu ve sertlik değerinin 25 HV5 oranında arttığı Şekil 7.2. da görülmektedir.



Şekil 7.2. Hadde yönüne dik ve paralel doğrultuda ikinci döküm numunelerin sertlik değerleri grafiği

Hadde yönüne paralel ve dik olarak alınan sertlik değerlerinin genel bir ortalaması alındığında, yaklaşık olarak 15 - 20 ppm bor oranı optimum değer olarak düşünülebilir. Taylor, K.A. ve arkadaşları[11] ise, 0,2 C - 6 Mn - 0,5 Mo çeliklerine 0, 10, 20, 50 ve 100 ppm bor ilave etmişler ve 50 ppm ve daha fazla bor numunelerin 10 ila 20 ppm bor içeren numunelerden sertliklerinin daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

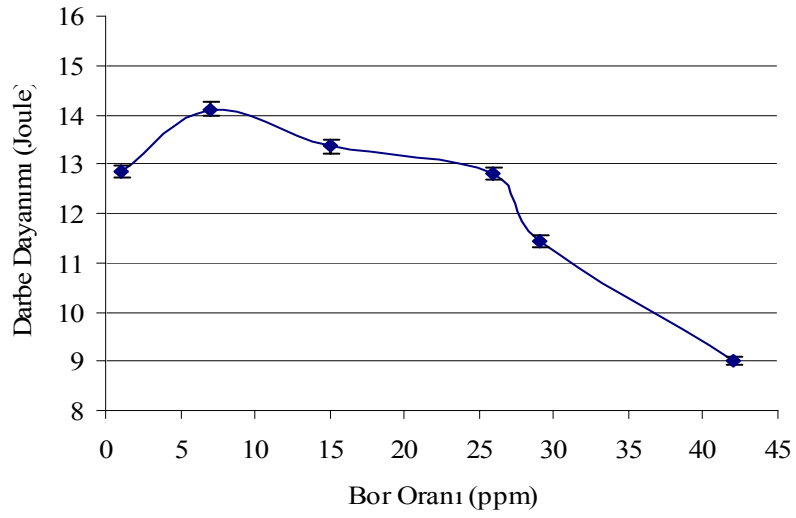
7.5. Darbe Deney Sonuçları ve Tartışma

Birinci döküm numunelerin çentikli darbe deney sonuçları Çizelge 7.8. de verilmiştir. Birinci döküm darbe deney sonuçlarında borsuz numunenin darbe dayanımı 12 joule iken, 7 ppm bor içeren numunenin darbe dayanımında 2 joule’lük bir artış gözlenmiştir. Daha sonra bor oranı arttıkça darbe dayanımının düştüğü gözlenmiştir.

Çizelge 7.8. Birinci döküm numunelerinin (Ç1020 çeliği) çentik darbe deney sonuçları

Malzeme No	Darbe Dayanımı (joule)	Bor Oranları (ppm)
1-1	12,840	Borsuz
2-1	14,117	7
3-1	13,364	15
4-1	12,802	26
4-2	11,444	29
5	9,006	42

42 ppm bor içeren numunenin darbe dayanımının 9 joule değerine düştüğü gözlenmiştir(Şekil 7.3). Birinci döküm çentikli darbe deneyleri sonucunda çentikli darbe dayanımı için optimum bor oranının yaklaşık olarak 10 ppm bor oranı olduğu gözlemlenmiştir.



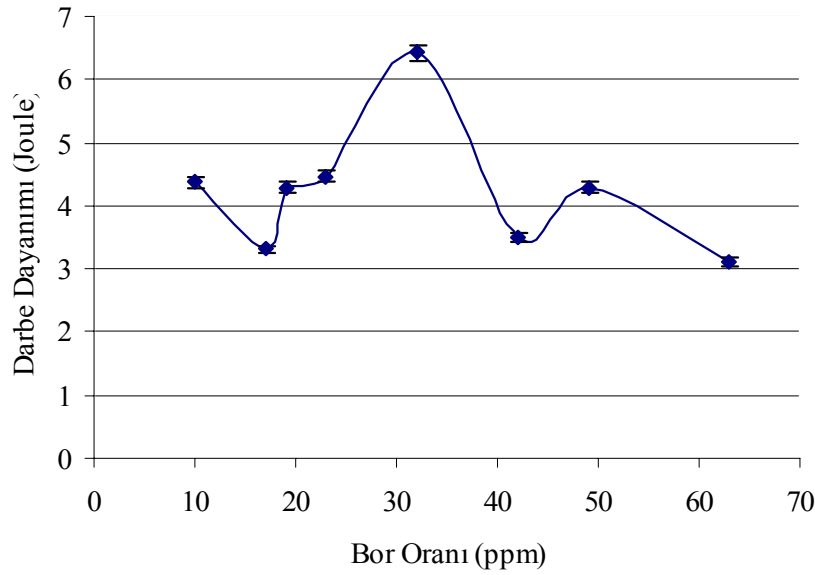
Şekil 7.3. Birinci döküm numunelerinin çentik darbe deney sonuçları grafiği

İkinci döküm numunelerinin çentikli darbe deney sonuçları Çizelge 7.9. da verilmiştir. İkinci döküm darbe deney sonuçlarına göre 30 ppm bor oranında 3 joule'lük bir artış gözlenmiştir. Daha sonra bor oranı arttıkça darbe dayanımı düşmüştür. 20 ppm bor oranında ise 1 joule değerinde bir düşüş görülmektedir

Çizelge 7.9. İkinci döküm numunelerinin (Ç1020 çeliği) çentik darbe deney sonuçları

Malzeme No	Darbe Dayanımı (joule)	Bor Oranları (ppm)
6	4,376	10
7	3,309	17
8	4,290	19
9	4,469	23
10	6,420	32
11	3,513	42
12	4,284	49
13	3,103	63

Şekil 7.4. de ikinci döküm numunelerinin çentik darbe deney sonuçları grafik olarak verilmiştir. Grafik olarak verilen şekilde de görüldüğü gibi 30 ppm bor oranında belirgin bir zirve oluşmuştur.



Şekil 7.4. İkinci döküm numunelerinin çentikli darbe deney sonuçları grafiği

Çentik darbe deneyi sonucu; I. dökümde optimum bor oranının 10 ppm olduğu, alüminyum ve titanyum oranının yüksek olan II. dökümde 30 ppm bor oranı optimum değer olarak gözlenmiştir. Alüminyum ve titanyum oranının I. döküme göre II. dökümde daha fazla olması darbe dayanımını yaklaşık 13 joule değerinden 6 joule civarı bir değere düşürmüştür. Yapılan sertlik testlerinde II. döküm numunelerinin sertliğinin I. döküm numunelere göre daha fazla olmasıyla da bu durum desteklenmektedir. Sertliği yüksek olan malzemenin darbe dayanımı düşüktür. Llewellyn, D. T. ve arkadaşları[8], sıcak çekilmiş borlu çelikleri incelemişler ve darbe dayanımına maksimum etkinin 30 ppm olduğu ve bor içeriğinin artması durumunda darbe dayanımının düştüğü sonucuna varmışlardır. Melloy, G.F. ve arkadaşları[7], Ç1020 çeliğine değişik oranlarda bor ilave etmiş ve çentik tokluğunun en yüksek olduğu değer 25 ppm olduğu sonucuna varmışlardır.

7.6. Çekme Deneyi Sonuçları ve Tartışma

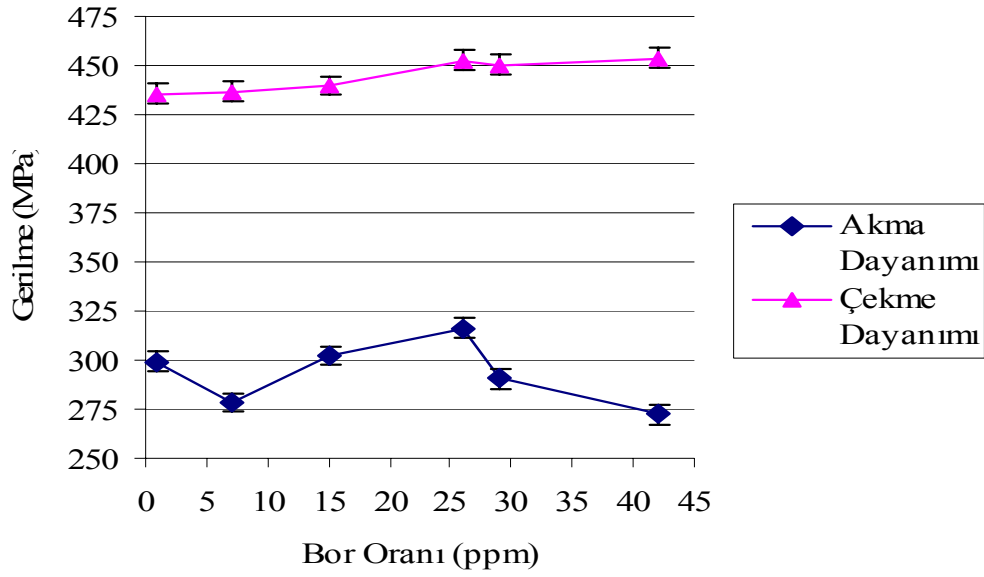
Birinci döküm numunelerin çekme test sonuçları Çizelge 7.10. da verilmiştir. Çekme test sonucuna bakıldığında akma dayanımında 26 ppm bor oranında 17 MPa artış

olduğu, çekme dayanımında ise 26 ppm'de 20 MPa artış olduğu gözlenmiştir. % uzamada ise dayanım artarken belirgin bir azalma olmamıştır(Şekil 7.5.). Dayanım artarken sünekliğin değişmemesi tokluğun arttığını göstermektedir.

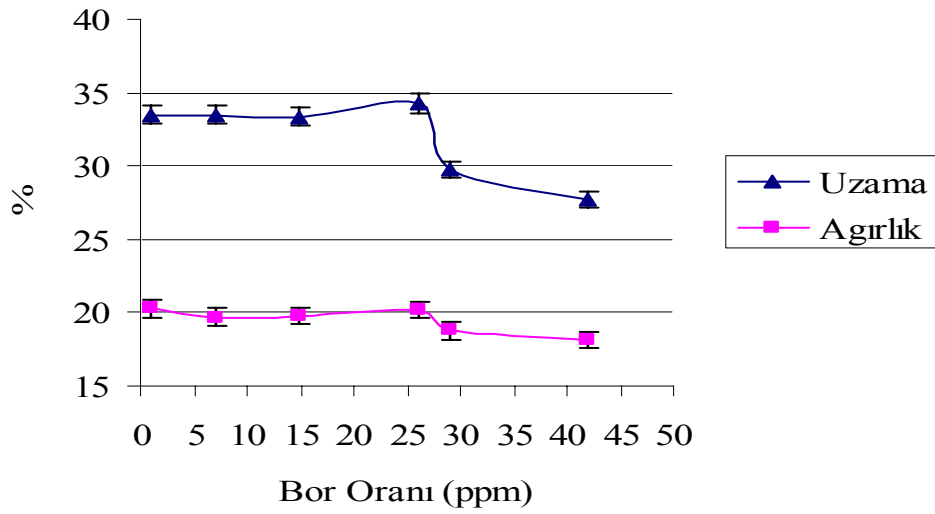
Çizelge 7.10. Birinci döküm numunelerin (Ç1020 çeliği) çekme test sonuçları

Malzeme No	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Ag %	Bor Oranları (ppm)
1-1	299,29	435,45	33,51	20,26	Borsuz
2-1	278,515	436,65	33,50	19,71	7
3-1	302,30	439,86	33,36	19,76	15
4-1	316,23	452,64	34,27	20,19	26
4-2	290,49	450,22	20,42	16,22	29
5	272,41	453,79	27,75	18,1	42

Şekil 7.5. de birinci döküm numunelerin çekme test sonuçları grafiği verilmektedir. 26 ppm bor oranında akma dayanımı ve çekme dayanımı için optimum değer olarak görülmektedir. Sertlik testleri sonucu optimum bor oranın 20 ppm çıkması çekme testleri sonuçlarıyla da uyumlu olduğu görülmüştür. Melloy, G.F. ve arkadaşları[7], Ç1020 çeliğine değişik oranlarda bor ilave etmiş ve akma dayanımının 20 ppm bor oranında en yüksek değere ulaştığını gözlemlemişlerdir. Paju, M. ve arkadaşları[10], su verilmiş ve tavllanmış yüksek saflıktaki laboratuvar çeliklerinin mekanik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlar ve yapılan değişik miktarda bor ile alaşımlandırmanın sertleştirilmiş ve tavllanmış çeliklerin çekme dayanımına etkisinin olmadığı sonucuna varmışlardır.



Şekil 7.5. Birinci döküm numunelerin çekme test sonuçları grafiği



Şekil 7.6. Birinci döküm numunelerinin % uzama ve kesit daralması sonuç değerleri grafiği

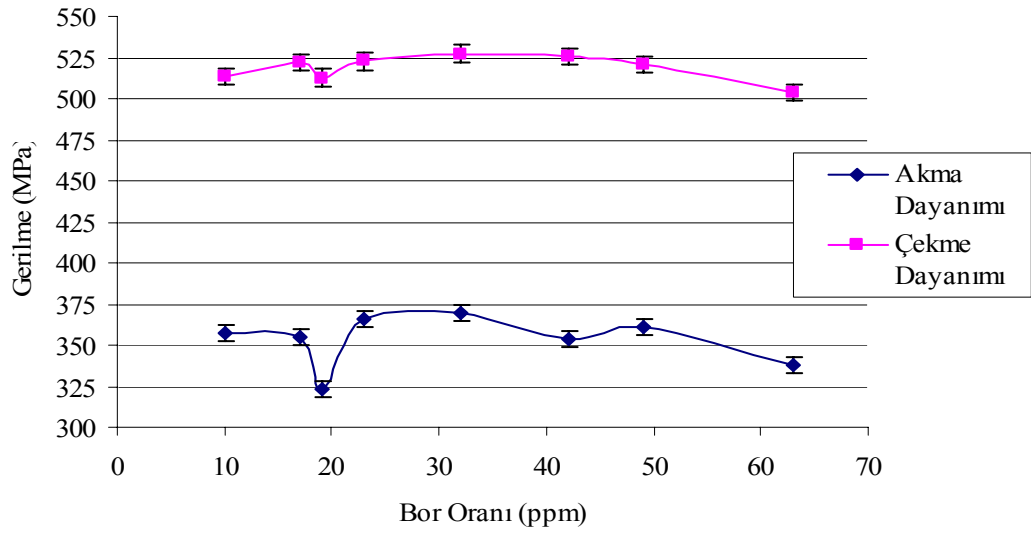
Şekil 7.6. da görüldüğü gibi 26 ppm bor oranından sonra % uzama ve kesit daralma düşmeye başlıyor. 26 ppm bor oranına kadar dayanım artarken sünekliğin sabit kalması metalurjik açıdan çok önemli bir sonuç göstergesidir.

İkinci döküm numunelerin çekme test sonuçları Çizelge 7.11. de verilmiştir. Çekme test sonucuna bakıldığında akma dayanımında 30 ppm bor oranında 15 MPa arttığı, çekme dayanımında ise 26 ppm'de 15 MPa bir artmış olduğu gözlenmiştir. % uzamada dayanım artarken, belirgin bir azalma olmamış ve aksine % 3 ila 4 oranında bir artış gözlenmiştir(Şekil 7.7.). Cho, Y.R. ve arkadaşları[12], düşük karbonlu çeliklere bor ilave etmiş ve bor eklenmiş düşük karbonlu çeliklerin yaklaşık %5 oranında ticari çeliklerden sünekliğinin daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir.

Çizelge 7.11. İkinci döküm numunelerin (Ç1020 çeliği) çekme test sonuçları

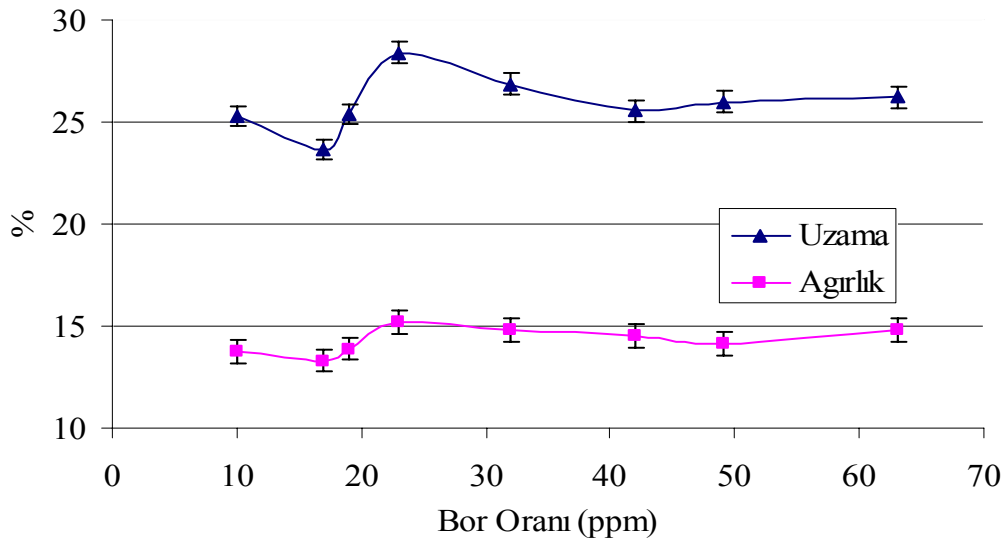
Malzeme No	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Ag %	Bor Oranları (ppm)
6	357,49	513,82	25,29	13,74	10
7	355,21	522,31	23,66	13,30	17
8	323,57	512,73	25,37	13,89	19
9	365,80	522,67	28,41	15,19	23
10	369,29	527,37	26,87	14,83	32
11	353,60	525,33	25,53	14,48	42
12	360,52	520,71	25,99	14,15	49
13	337,97	503,23	26,22	14,82	63

Şekil 7.7. de akma dayanımı ile çekme dayanımının aynı oranda arttığı gözlenmiştir. 30 ppm bor oranı akma ve çekme dayanımları açısından optimum değer olarak alınabilir.



Şekil 7.7. İkinci döküm numunelerin çekme test sonuçları grafiği

Şekil 7.8. de akma ve çekme dayanımının artmasını sağlayan 30 ppm bor oranı değeri sünekliği düşmesi gerekirken arttığı gözlenmiştir.



Şekil 7.8. İkinci döküm sonrası çekme testi % uzama ve kesit daralması sonuç değerleri grafiği

Mikroyapı incelemeleri ve mekanik testler sonucunda elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu 20 ila 30 ppm bor oranının Ç1020 çeliği için akma ve çekme dayanımının arttığı, sertlik dayanımı ve darbe dayanımı için optimum değer olması ve

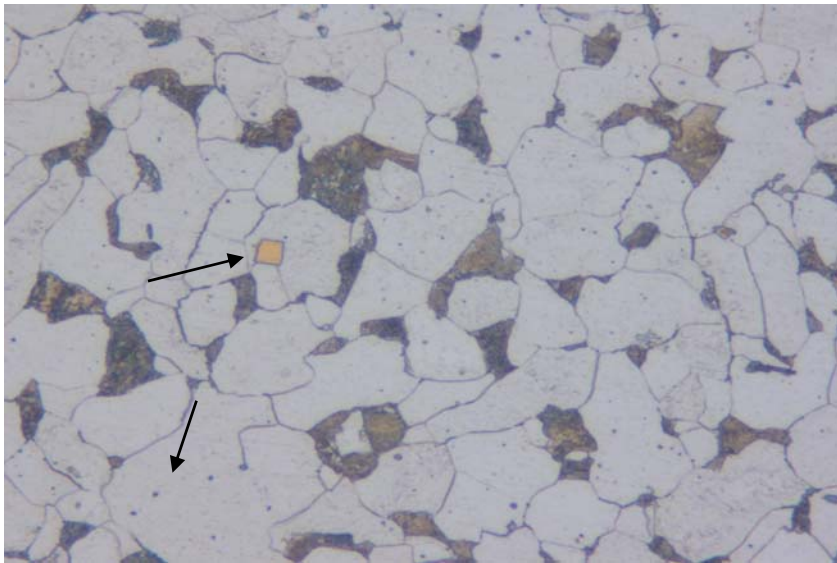
dayanım artarken düşmesi gereken sünekliğin ise düşmeyip artması üretilen çeliğin bor katı eriyik oranına ve oluşan çökeltilerin BN, TiN partikül dislakasyon etkileşimi mekanizması gereği olarak arttığı düşünülmektedir.

Dayanım artarken düşmesi gereken sünekliğin ise düşmeyip artması üretilen çeliğin katı eriyik oranının artırılması ve oluşan çökeltilerin kontrolü ile düşük karbonlu adi çeliklerin kaliteli çelik sınıfında yararlanabileceği düşünülmektedir. Özellikle inşaat çelikleri ve YDDA çeliklerinin yerine, üretilebilecek borlu mikro alaşımlı çelikler kullanılabilir.

7.7. Isıl İşlem Sonuçları ve Tartışma

7.7.1. Isıl işlem sonrası mikroyapı sonuçları ve tartışma

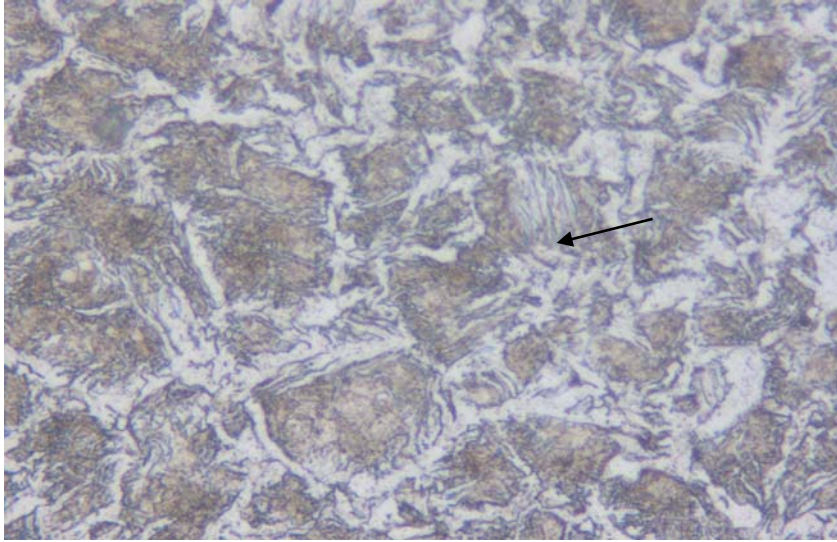
Borsuz, 15 ve 26 ppm bor içeren Ç1020 çeliği 875 °C’de 60 dakika fırında bekletildikten sonra havada ve suda soğutulmuştur. Havada ve suda soğutulan numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Havada soğutulmuş borsuz malzemenin mikroyapı fotoğrafı Resim 7.51. de verilmiştir.



Resim 7.51. Havada soğutulmuş borsuz malzemenin mikroyapı fotoğrafı (X500)

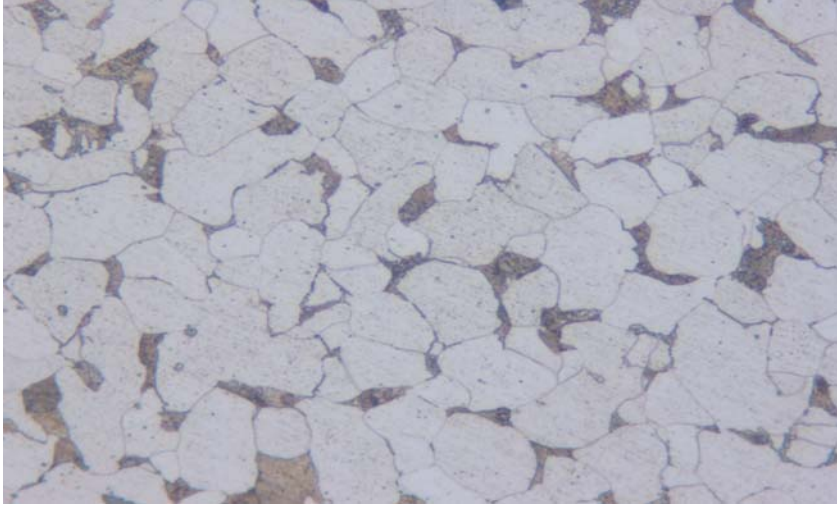
Havada soğutulmuş borsuz malzemenin mikroyapı fotoğraflarında tanelerin homojen olduğu görülmektedir. Havada soğutulmuş borsuz numunenin mikroyapı fotoğraflarında ok ile gösterilen TiN ve küresel noktalar görülmüştür.

Suda soğutulmuş borsuz malzemenin mikroyapı fotoğrafları Resim 7.52. de verilmiştir. Suda soğutulmuş borsuz malzemenin mikroyapı fotoğraflarında ok ile gösterilen çita (lath) tipi martenzit görülmektedir. Beyaz olarak görülen yapı ise widmanstatten ferrit olduğu görülmektedir.



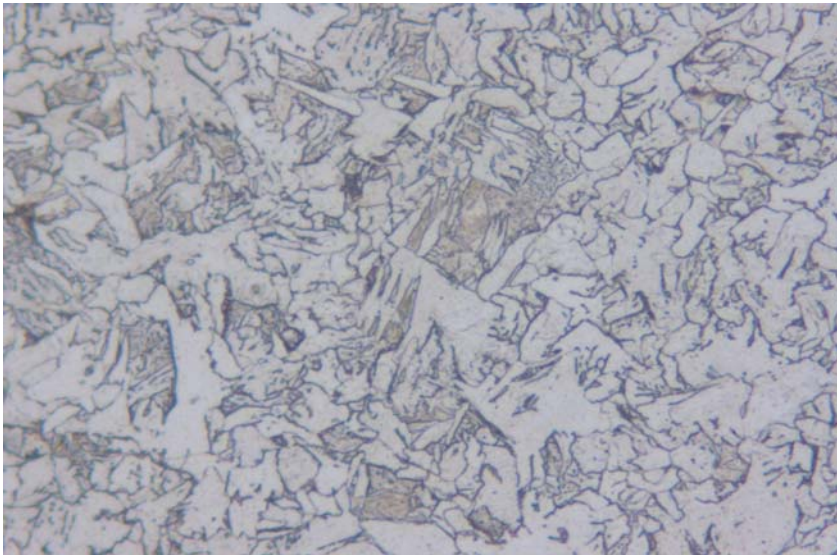
Resim 7.52. Suda soğutulmuş borsuz malzemenin mikroyapı fotoğrafı (X500)

Havada soğutulmuş 15 ppm bor içeren malzemenin mikroyapısı fotoğrafı Resim 7.53. de verilmiştir. Havada soğutulmuş borsuz numunenin mikroyapı fotoğraflarında TiN ve küresel noktalar olduğu gözlenmiştir.



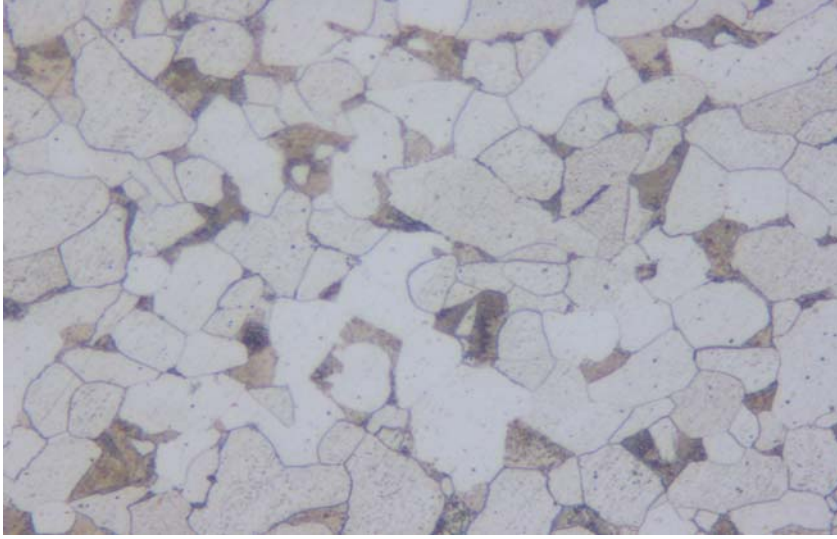
Resim 7.53. Havada soğutulmuş 15 ppm bor içeren malzemenin mikroyapı fotoğrafı (X500)

Suda soğutulmuş 15 ppm bor içeren malzemenin mikroyapı fotoğrafları Resim 7.54. de verilmiştir. Suda soğutulmuş 15 ppm bor içeren malzemenin mikroyapı fotoğraflarında çita (lath) tipi martenzit ve widmanstatten ferrit görülmektedir. Tanelerin havada soğutulan numunelere göre daha küçük boyutlarda ve yoğunlukta olduğu görülmektedir.



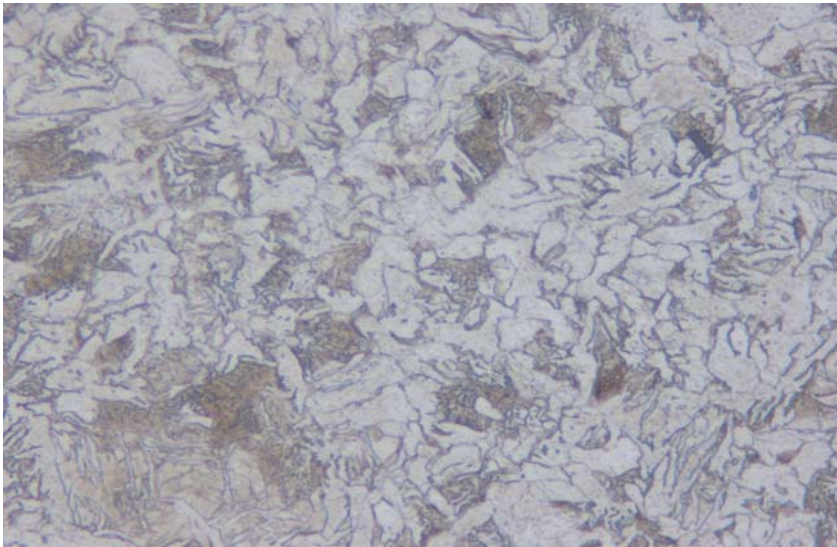
Resim7.54. Suda soğutulmuş 15 ppm bor içeren malzemenin mikroyapı fotoğrafı (X500)

Havada soğutulmuş 26 ppm bor içeren malzemenin mikroyapı fotoğrafı Resim 7.55. de verilmiştir. Havada soğutulmuş 26 ppm bor içeren numunenin mikroyapı fotoğraflarında TiN ve kısmen BN olduğu düşünülen küresel noktalar gözlenmiştir.



Şekil 7.55. Havada soğutulmuş 26 ppm bor içeren malzemenin mikroyapı fotoğrafı (X500)

Suda soğutulmuş 26 ppm bor içeren malzemenin mikroyapı fotoğrafları Şekil 7.56. da verilmiştir.



Şekil 7.56. Suda soğutulmuş 26 ppm bor içeren malzemenin mikroyapısı fotoğrafı (X500)

Suda soğutulmuş 26 ppm bor içeren malzemenin mikroyapı fotoğraflarında çita (lath) tipi martenzit ve widmanstatten ferrit görülmektedir. Tanelerin havada soğutulan numunelere göre daha küçük boyutlarda olduğu gözlenmektedir

Borsuz, 15 ve 26 ppm bor içeren Ç1020 çeliğine yapılan ısıtma işlemi sonucunda havada soğutulan numunelerin haddelenmiş numune tane yapısı ile boyutsal olarak aynı ASTM numarasına sahip olmasından da anlaşılmaktadır.

7.7.2. Isıl işlem sonrası sertlik deney sonuçları ve tartışma

Borsuz, 15 ve 26 ppm bor içeren Ç1020 çeliği 875 °C’de 60 dakika fırında bekletildikten sonra havada ve suda soğutulmuştur. Havada ve suda soğutulan numunelerden hadde yönüne dik ve paralel olmak üzere sertlik ölçümleri yapılmıştır. Çizelge 7.12. de suda soğutulmuş Ç1020 çeliğinin I. döküm numunelerinin hadde yönüne dik ve hadde yönüne paralel sertlik değerleri verilmektedir.

Çizelge 7. 12. Suda soğutulmuş Ç1020 çeliğinin I. döküm numunelerin Vickers sertlik deney sonuçları

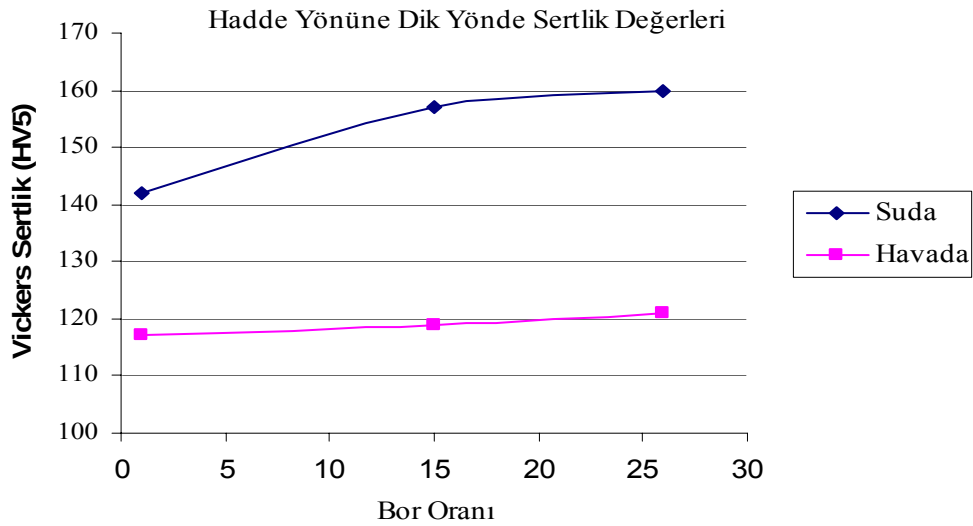
Malzeme No	Hadde Yönüne Dik (HV 5)	Hadde Yönüne Paralel (HV 5)	Bor Oranları (ppm)
1-1	142	150	Borsuz
3-1	157	159	15
4-1	160	153	26

Çizelge 7.13. de havada soğutulmuş Ç1020 çeliğinin I. döküm numunelerinin hadde yönüne dik ve hadde yönüne paralel yönde sertlik değerleri verilmektedir.

Çizelge7. 13. Havada soğutulmuş Ç1020 çeliğinin I. döküm numunelerin Vickers sertlik deney sonuçları

Malzeme No	Hadde Yönüne Dik (HV 5)	Hadde Yönüne Paralel (HV 5)	Bor Oranları (ppm)
1-1	117	122	Borsuz
3-1	119	120	15
4-1	121	126	26

Şekil 7.9. da suda ve havada soğutulmuş numunelerin I. döküm numunelerinin hadde yönüne dik yönde Vickers sertlik değerleri grafik olarak gösterilmiştir.

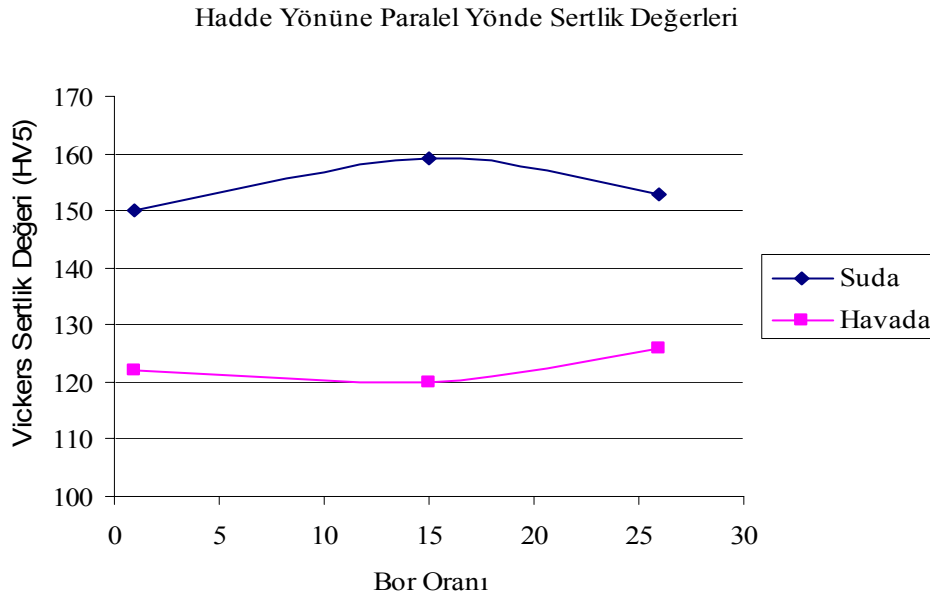


Şekil 7.9. Havada ve suda soğutulmuş Ç1020 malzemesinin I. döküm numunelerinin hadde yönüne dik yönde elde edilen sertlik değerleri.

I. döküm numunelerinin hadde yönüne dik yönde suda soğutulmuş Ç1020 malzemesinde borsuz numunenin sertlik değeri 142 HV5 iken, 26 ppm bor olan suda soğutulmuş malzemede 160 HV5'e yükselmiştir. Yaklaşık olarak 18 HV5 artış

olduğu gözlenmiştir. Bu hızlı soğutma neticesinde mikroyapıda martenzit yapı ve widmanstatten ferrit elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Hadde yönüne dik yönde havada soğutulmuş Ç1020 malzemesinde borsuz numunenin sertlik değeri 117 HV5 iken, 26 ppm bor olan suda soğutulmuş malzemedede 121 HV5'e yükselmiştir. Yaklaşık olarak 4 HV5 artış olduğu gözlenmiştir. Bu oran hata payı olarak değerlendirirsek havada soğutulmuş Ç1020 malzemesin hadde yönüne dik yönde sertlik değerlerinde artış gözlenmemiştir.

Şekil 7.10. da suda ve havada soğutulmuş numunelerin hadde yönüne paralel Vickers sertlik değerleri grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.10. Havada ve suda soğutulmuş Ç1020 malzemesinin I. döküm numunelerinin hadde yönüne paralel yönde elde edilen sertlik değerleri.

I. döküm numunelerinin hadde yönüne paralel yönde suda soğutulmuş Ç1020 malzemesinde borsuz numunenin sertlik değeri 150 HV5, 15 ppm bor içeren malzemenin sertlik değeri 159 HV5 yükselmiş ve 26 ppm bor olan suda soğutulmuş malzemedede ise sertlik değeri 153 HV5'e düşmüştür. Yaklaşık olarak sertlik değerinde 9 HV5 artış olmuş ve tekrar yaklaşık olarak başlangıç seviyesine düştüğü gözlenmiştir. Bu artış miktarları düşük miktarlarda olması hata payı olarak kabul etmemize neden olmaktadır. Hadde yönüne paralel yönde havada soğutulmuş Ç1020

malzemesinde borsuz malzemenin sertlik değeri 120 HV5, 15 ppm bor içeren malzemenin sertlik değeri 120 HV5 düşmüş ve 26 ppm bor olan suda soğutulmuş malzemede ise sertlik değeri 126 HV5'e çıkmıştır. Yaklaşık olarak 2 HV5 sertlik değerinde düşüş olmuş ve 26 ppm bor içeren malzemede ise 6 HV5 değerinde sertlikte artış olduğu gözlenmiştir.

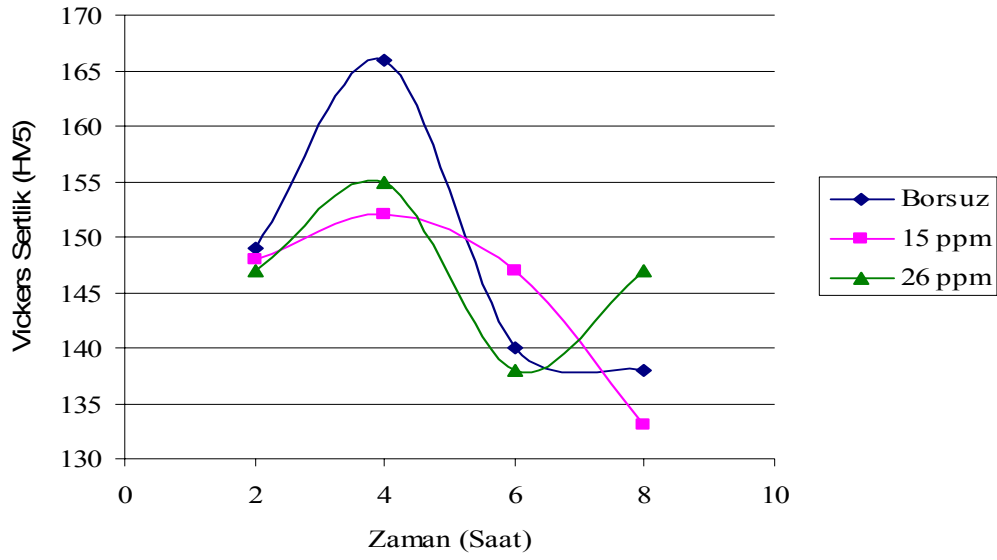
7.8. Yaşlandırma İşlemi Sonuçları ve Tartışma

I. döküm numunelerinden borsuz, 15 ve 26 ppm bor içeren Ç1020 çeliği 875 °C'de 60 dakika fırında bekletildikten sonra havada ve suda soğutulmuştur. Suda soğutulan numuneler 200 °C de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile bekletilerek yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Değişik sürelerde yaşlandırma işlemi uygulanan malzemelerin Vickers sertlik değerleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 7.14. de 200 °C de değişik sürelerde yapılan yaşlandırma işlemi sonucu Vickers sertlik sonuçları verilmektedir.

Çizelge 7.14. 200 °C de değişik sürelerde yapılan yaşlandırma işlemi sonucu Vickers sertlik sonuçları

Yaşlandırma Sıcaklığı (°C)	Yaşlandırma süreleri (Saat)	Bor Oranları	Suda Soğutulmuş Numunelerin Sertlik Test Sonuçları (HV5)
200 °C	2 Saat	Borsuz	147
		15 ppm	148
		26 ppm	149
	4 Saat	Borsuz	155
		15 ppm	153
		26 ppm	165
	6 Saat	Borsuz	138
		15 ppm	147
		26 ppm	140
	8 Saat	Borsuz	147
		15 ppm	133
		26 ppm	138

Şekil 7.11. de suda soğutulmuş farklı oranlarda bor içeren numunelere değişik sürelerde uygulanan yaşlandırma işlemi sonucu Vickers sertlik değerleri verilmektedir.



Şekil 7.11. Suda soğutulmuş farklı oranlarda bor içeren numunelere değişik sürelerde uygulanan yaşlandırma işlemi sonucu sertlik değerleri grafiği.

Yapılan yaşlandırma işleminde üretilen borlu çeliğin yaşlanma eğiliminin olmadığı sonucuna varılmıştır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

İnşaat ve doğal gaz boru hatlarında kullanılan yapı çeliklerinden Ç1020 çeliğine değişik oranlarda bor ilave edilerek mikro alaşımlama yapılmıştır. 2 ayrı vakumsuz ortamda döküm yapılmıştır. I. döküm işleminde borsuz, 7, 15, 26, 29 ve 42 ppm bor elde edilmiştir. II. döküm işleminde ise 10, 17, 19, 23, 32, 42, 49 ve 63 ppm bor elde edilmiştir. Değişik oranlarda elde edilen borlu 30x30 kare Ç1020 çelikler 2 pasoda haddelenerek % 70 – 80 deformasyon sağlanmıştır.

1) Haddelenen numuneler optik mikroskopta incelenmiş ve tane içerisinde heterojen 0,1 ila 2 μm arasında küresel siyah noktalar olduğu gözlenmiştir. Ayrıca yer yer I. dökümde 1 ila 5 μm büyüklüğünde turuncu renkte köşeli parçacıkların olduğu gözlenmiştir. II. dökümde titanyum oranının artması ile birlikte turuncu renkte köşeli parçacıkların arttığı ve boyutlarının 10 ila 12 μm büyüklüğünde olduğu gözlenmiştir.

2) SEM ile yapılan incelemelerde optik mikroskop ile görülen siyah noktaların nokta analizleri yapılmış ve sementit parçacıkları olduğu tespit edilmiştir. Optik mikroskop ile görülen turuncu renkte köşeli parçacıkların ise SEM ile inceleme sonrasında titanyum nitrid (TiN) olduğu anlaşılmıştır.

3) Elektron Prob Mikro Analiz (EPMA) ile yapılan incelemelerde ise, (SEM incelenesi sonrası sementit olarak belirlenen küresel siyah küresel parçacıkların bazılarının) özellikle ferrit tanelerinin içerisinde görülen siyah noktaların koyu olanlarının bor nitrid (BN) olduğu nokta analizi ile tespit edilmiştir. EPMA ile yapılan haritalama metodu ile de borun homojen olarak yapı içerisinde dağıldığı gözlenmiştir.

4) Değişik oranlarda bor içeren Ç1020 çeliğine yapılan sertlik testlerinde 15 - 20 ppm bor içeren Ç1020 çeliğinde 20 HV5 değerinde bir artış gözlenmiştir. Çentik darbe deneyinde I. dökümde 10 ppm bor oranında artış gözlenirken, II. dökümde 30 ppm bor oranında artış gözlenmiş ve optimum değerler olarak görülmüştür.

5) Çekme testleri sonuçlarına göre ise, çekme test sonucuna bakıldığında akma dayanımında 26 ppm bor oranında 17 MPa artış olduğu, çekme dayanımında ise 26 ppm'de 20 MPa artış olduğu gözlenmiştir. % uzamada ise dayanım artarken belirgin bir azalma olmamıştır. Dayanım artarken sünekliğin değişmemesi aynı zamanda nisbeten tokluğun arttığını göstermektedir. Sertlik değeri ve akma - çekme dayanımı I. dökümde 10 ppm bor oranında düşerken, darbe dayanımının arttığı gözlenmiştir. Vakumsuz indüksiyon ocağında döküm işleminin gerçekleştirilmesi, işlemin kontrolünü zorlaştırmış ve bor nitrür oluşması ve büyük partiküller halinde titanyum nitrür oluşması engellenememiştir.

6) Haddelenmiş borsuz, 15 ve 26 ppm bor içeren Ç1020 malzemesi 875 °C'de 1 saat bekletilerek havada ve suda soğutularak ısıtılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Suda soğutulan numunelerin hepsinde çıta martenzit ve widmannstaten ferrit görülürken, havada soğutulan numunelerin homojen ferrit ve perlit içerdiği gözlenmiştir. Isıl işlem sonrası değişik bor oranlarında sertlik değerlerinde belirgin bir fark görülmemiştir. Ayrıca suda soğutulan malzeme 200 °C'de 2, 4, 6 ve 8 saat süre bekletilerek yaşlandırma işlemi yapılmış fakat mevcut üretilen çeliğin yaşlandırma eğilimi olmadığı anlaşılmıştır.

Mikroyapı incelemeleri ve mekanik testler sonucunda elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu 20 ila 30 ppm bor oranının Ç1020 çeliği için akma ve çekme dayanımının arttığı, sertlik dayanımı ve darbe dayanımı için optimum değer olması ve dayanım artarken düşmesi gereken sünekliğin ise düşmeyip artması üretilen çeliğin bor katı eriyik oranına ve oluşan çökeltilerin BN, TiN partikül dislokasyon etkileşimi mekanizması gereği olarak arttığı düşünülmektedir.

Yapılan bu tez çalışmasında iki ayrı döküm yapılmış ve yukarıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçları iyileştirmek için öneriler;

1) Daha fazla döküm yapılması ve döküm sürecinin daha iyi kontrol edilmesi gerekir. Daha fazla döküm ve sürecin iyi kontrolünün Ç1020 adi çeliğini ve benzeri çelikleri bor ilavesi ile kaliteli çelik sınıfına sokulabileceği düşünülmektedir.

2) Değişik haddeleme oranlarında ve soğutma hızlarında mikroyapı ve mekanik özellikler üzerinde daha fazla deneysel çalışmalar yapılması gerektiği düşünülmektedir. Bu sayede borlu çeliklerin daha geniş bir kullanım alanı bulabileceği düşünülmektedir.

3.) Değişik ısıtma işlemleriyle mevcut borlu çeliklerin ve elde edilecek yeni borlu çeliklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri geliştirilmelidir.

Ülkemizin değerli bir kaynağı olan boru, çelik içerisine ilave edilerek daha verimli bir şekilde kullanılacağı düşünülmektedir. Benzer çalışmaların artması, pahalı çelik türlerine alternatif borlu çelikler üretilip geliştirilebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Elyutin, V.P., Pavlov, Y. A., Levin, B.E., ‘‘Ferroalaşımların İstihsalı’’, **TULGAR, H. E.**, İstanbul, 1-76 (1968).
2. Angın, M. H., ‘‘Ferrobor Fizibilite Raporu’’, **Eti Holding** , Ankara, 3-26 (2003).
3. Grange, R. A., Garvey, T.M., ‘‘The distribution of boron in austenite’’, **Transactions ASM**, 37, 136-140, (1946).
4. Granga, R. A. ve Mitchell, J. B., ‘‘The influence of dissolution and precipitation behavior’’, **Transactions ASM**, 53, 157-162, (1961).
5. Fountain, R. W., Chipman, J., ‘‘Solubility and precipitation of boron nitride in iron-boron alloys’’, **Transactions of The Metallurgical Society of AIME**, 224, 599-605, (1962).
6. Ohmori, Y., ‘‘The isothermal decomposition of an Fe-C-B austenite’’, **Transactions ISIJ**, 11, 339-348, (1971).
7. Melloy, G.F., Slimmon, P.P., Podgursky, P.P., ‘‘Optimizing the boron effect’’, **Metallurgical Transactions**, 4, 2279-2289, (1973).
8. Llewellyn, D. T., Cook, W.T., ‘‘ Metallurgy of boron-treated low-alloy steel’’, **Metals Technology**, 517-529, Dec. (1974).
9. Malinochka, Y. N., Koval’chuk, G.Z., Yarmosh, V.N., ‘‘Structure and properties of low-carbon steel alloyed with boron and copper’’, **Translated from Metallovedenie Termicheskaya Obrabotka Metallov**, 11, 10-14, (1982).
10. 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, 235-242, (1989).
11. Taylor, K. A., Hansen, S.S., ‘‘The boron hardenability effect in thermomechanically processed, direct-quenched 0,2 Pct steels’’, **Metallurgical Transactions**, 21A, Bethlehem, 1697-1708, (1990).
12. Cho, Y. R., Kim, S. I. ve Seong, B.S., ‘‘Effect of boron addition on the microstructure and mechanical properties of low-carbon steels’’, **Iron & Steel Technology**, Korea, 1-6, (2004).
13. S. S., YILMAZ, Demir esaslı T/M parçaların yüzey sertleştirme işlemlerinin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi, Doktora Tezi, **Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 1-151, (2004).

14. Özsoy, A., ‘‘Çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş zonu ve ana matriksin özelliklerinin iyileştirilmesi’’, Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 25-100, (1996).
15. Ediz, N., Özdağ, H., ‘‘Bor mineralleri ve ekonomisi’’, DPÜ, *FBE Dergisi*, Eskişehir, 2-15, (2001).
16. Duman, İ., ‘‘Bor’’, *I. Uluslar arası Bor Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Kütahya, 145-155, (2002).
17. Goeuriot, P.Y., Fillit, P., Thevenot, F., ‘‘The influence of alloying element additions on the boriding of steels’’, *Mat. Sci. and Eng.*, 9-19, (1982).
18. Matuschka, A.G.V., ‘‘Boronozing’’, *Wien:Hanser*, 100-105, (1980).
19. ‘‘2008 Bor Raporu’’, *Eti Maden İşl. Gen. Müd. Yayınları*, Ankara, (2008).
20. ‘‘2006 Bor Raporu’’, *Eti Maden İşl. Gen. Müd. Yayınları*, Ankara, (2006).
21. ‘‘İstatistiklerle Türkiye 2008’’, *TÜİK*, Ankara, (2008).
22. Topbaş, A., ‘‘Çelik ve Isıl İşlem’’, *İTÜ*, İstanbul, 1-102, (1998).
23. Smith, W.F., ‘‘Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri’’, Erdoğan, M., *Nobel Yayıncılık*, Ankara, 30-150, (2000).
24. Şavaşkan, T., Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Makine Mühendisliği, KTÜ, *Derya Kitabevi*, Trabzon, 132-168, (1999).
25. Kazdal Zeytin, H., ‘‘Demir ve Çelik Malzemelerin Mikroyapısı’’, *TÜBİTAK MAM Eğitim Notları*, Gebze, 88-118, (2007).
26. Deardo, A.J., ‘‘New developments in the alloy design of microalloyed and other modern HSLA steels’’, *Metals & Materials*, USA, (1992).
27. Koltuk, F., Bakkaloğlu, A., ‘‘Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerde mikroalaşım elementlerinin dönüşüm ve yapı üzerindeki etkisi’’, *Metal Dünyası*, 59, İstanbul, 19-22, (1998).
28. Korchynsky, M., ‘‘A new role for microalloyed steels-adding economic value’’, *Consultant in Metallurgy*, Pittsburgh, 1-5, (1993).
29. Sage, A. E., ‘‘An overview of the use of microalloys in HSLA steels with particular reference to vanadium and titanium’’, *Metals & Materials*, 51-56, (1992).

30. Mavropoulos, T., Jonas, J. J., ‘‘Effect of boron on dynamic and static recrystallization in ultra low-carbon Nb steels’’, *Metallurgy and Applications*, China, 229-235, (1985).
31. Taş, Z., ‘‘Nb-V alaşımlı borlu çeliklerinde mikroyapı - mekanik özelliklerin ilişkisi’’, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Kayseri, 22, 152-160, (2006).
32. Engl, B., Fuchs, A., ‘‘Möglichkeiten einer zusaetzlichen zaehtigkeitssteigerung an TM-gewalzten warmbreitband für grossrohre’’, *Stahl u. Eisen*, Germany, 25-30, (1981).
33. Askeland, D.R., ‘‘Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeler’’, Erdoğan, M., *Nobel Yayıncılık*, Ankara, 20-60, (2000).
34. Smith, W.F., ‘‘Malzeme Bilimi ve Mühendisliği’’, Kınıkğlu, N. G., *Literatür Yayıncılık*, İstanbul, (2001).
35. Hayden, H.W., Moffat, W.G., Wulff, J., ‘‘Malzemelerin Yapı ve zellikleri’’, Onaran, K., *İT Matbaası*, İstanbul, 35-100, (1993).
36. Atik, E., ‘‘Farklı bir yüzey sertleştirme yöntemi: borlama’’, *Makine & Metal Teknolojisi*, 117, 86-90, (2001).
37. zbek, İ., ‘‘Borlama yöntemiyle AISI M50, AISI M2 yüksek hız çeliklerinin ve AISI W1 eliğinin performansının geliştirilmesi’’, Doktora Tezi, *SA Fen Bilimler Enstitüsü*, Sakarya, 5-40, (2000).
38. Mal, K.K., Tarkan, S.E., ‘‘Diffused boron ups hardness wear resistance of metals’’, *Materials Engineering*, London, 77, 70-71, (1973).
39. Bozkurt, N., ‘‘Bor yayınımlı ve çeliklerde yüzey sertleştirme’’, Doktora Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 15-65, (1984).
40. Yücel, O., ‘‘Karbitermik ferrobör üretim parametrelerinin optimizasyonu’’, Doktora Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 16-55, (1992).
41. zmen, L., Utkanlar, N., zmel, B., ‘‘Borlu elik’’, *3. Uluslararası Bor Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Ankara, 49-55, (2006).
42. Kentaro, A., Koji, S., ‘‘Behavior of boron in the phase transformation’’, *Research Review on Boron in Steels and Targets for Next Century*, Tokyo, 43-51, (1999).
43. ‘‘Roskill Report: The Economics of Boron’’, *Roskill Information Service Ltd*, U.K., 55-95, (1999).

44. Civelekoğlu, H., Tolun, R., Bulutçu, N., "İnorganik Teknolojiler", *İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları*, İstanbul, (1987).
45. *Chemical Economics Handbook*, SRI International, California, 15-85, (1993).
46. *Chemicals Economics Handbook*, SRI Consulting, California, 36-99, (2000).
47. *American Seramic Society Bulletin*, USA, 74-96 (1995).
48. *American Seramic Society Bulletin*, USA, 73,6, (1994).
49. "İnorganik Bor Bileşikleri Kaynak Araştırması-Bor Nitrür", *TÜBİTAK MAM*, Kocaeli, 1-56, (2000).
50. İzmir, A.İ., "Kimyasal buhar çöktürme yöntemi ile bor karbür üretimi", Yüksek Lisans Tezi, *G.Ü. Fen Bilimleri Ens.*, 3-7, (2001).
51. "Kimyasal Madde Araştırması, Bor Bileşikleri", TÜMAŞ, *T.C. Başbakanlık, Devlet Planlama Teşkilatı, Müsteşarlık Araştırma Grubu Başkanlığı*, Ankara, (1990).
52. Otto K., Schrey A., "Hard and Protective Materials", *Handbook of Thin Film Process Technology*, Z1, 1-12, (1995).
53. May P.W., Rosser K.N., Fox N.A., Younes C.M., Beardmore G., "Deposition of CVD diamond onto boron carbide substrates", *Diamond and Related Materials*, 450-455, (1997).
54. Hai-ying C., Jing W., Hai Y., Wen-Zhi L., Heng-De L., "Synthesis of boron carbide films by on beam sputtering", *Surface & Coating Tech*, 128-129, (2000).
55. Ploog, K., "Composition and structure of boron carbides prepared by CVD", *J. Crys. Growth*, 24, 197, (1974).
56. Kuhlman, U., Weheit, E., "On the microstructure of boron carbide", *Solid State Com.*, 83, 849-852, (1992).
57. Grigor'ev Y.M., Shugaev V.A., Mukas'yan A.S., Samoilenko N.G., Shiryayev A.A., "The chemical vapour deposition of boron carbide from a BCl₃-C₇H₈-H₂ mixture on to a heated support", *Russion Journal of Inorganic Chemistry*, 1089-1091, (1991).
58. Beam, C.P, Fleischer, R. L., Swart, P. W., Hart, H. R., "Effect of thermal-neutron irradiation on the superconducting properties of Nb₃Al and V₃Si doped with fissionable impurities", *Journal Applied Phys.*, 37, 2218-2225, (1966).

59. Koyama, R., Tsukamoto, T., ‘‘Boron-Added steel’’, *Simitomo Metals*, Japonya, 48, 195-197, (1996).
60. ‘‘Çeliğin sertleşebilirliğine borun etkisi’’, <http://www.steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?catid=163&pageid=2081271726>, (2008).
61. Şen, Ş., ‘‘Termokimyasal borlama işlemiyle AISI 5140, AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerinin yüzey performanslarının geliştirilmesi’’, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Ens.*, 20-35, (1998).
62. Liao, P.K., Spear, K.E., ‘‘B-Fe (Boron-Iron) binary diagrams of binary iron alloys’’, *Journal of Phase Equilibria*, 41-47, (1974).
63. Vlack, W., ‘‘Elements of Materials Science and Engineering’’, *Addison Wesley Published Company Inc.*, USA, 6, 600-625, (1985).
64. Hayashi, Y., Sugeno, T., ‘‘Nature of boron in Iron’’, *Acta Metalurgica*, 18, 693-697, (1970).
65. Kubaschewski, O., ‘‘Iron Binary phase diagrams’’, *Springer*, Verlag, 15, (1982).
66. Quing’en, M., Zaizhi, C., ‘‘Boronization process in steel: theory of diffusion channel, model of boron atoms, heat treatments, **3. International Congress on Heat Treatment of Materials**, Shanghai, China, 555-561, (1983).
67. Badini, C., Gianoglio, C., Paradelli, G., ‘‘Preferential distribution of chromium and nickel in the borided layer obtained on synthetic Fe – Cr – Ni alloys’’, *J. of Material Science*, 21, 1721 – 1729, (1986).
68. ‘‘Roskill Report: The Economics of Boron’’, *Roskill Information Service Ltd*, U.K., (1995).
69. Vlack, W., ‘‘Elements of Materials Science and Engineering’’, *Addison Wesley Published Company Inc.*, USA, 7, 300-315, (1986).
70. Masakatsu, U., ‘‘Hardenability of low-carbon steel and boron’’, *Research Review on Boron in Steels and Targets for Next Century*, Tokyo, 78-86, (1999).
71. Tomoya, F., ‘‘Hardenability improvement effect of the boron in TMCP’’, *Research Review on Boron in Steels and Targets for Next Century*, Tokyo, 78-86, (1999).
72. Nakasato, F., Takahashi, M., ‘‘ Effects of Boron, Titanium and Nitrogen on The Hardenability of Boron-Treated Steels Heavy Machinery’’, *Metals Technology*, 102-105, (1979).

73. Ertürkmen, M., “Borlu çelikler”, Yüksek Lisans Tezi, **Marmara Üniv. FBE**, İstanbul, 15-42, (1987).
74. Wang, X.M. ve He, X.L., “Effect of boron addition on structure and properties of low carbon bainitic steels”, **ISIJ Int.**, 42, 621-633, (2002).
75. Er, Ü., Gaşan, H., “Bazı borlu çeliklerin toprak işleme aletlerinin uç demirlerinde kullanımının laboratuvar koşullarında incelenmesi”, **23. Ulusal Tarımsal Mekanizasyon Kongresi Bildiriler Kitabı**, Çanakkale, 232-230, (2006).
76. Armijo, J. S., Rosenbaum, H. S., “Boron detection in metals by alpha-particle tracking”, **Journal of Applied Physics**, 38, 2064-2069, (1967).
77. Akgündüz, T., “Çelikte alaşım elementi olarak bor ve borlama ile yüzey sertleştirme”, Yüksek Lisans Tezi, **İTÜ Fen Bilimleri Ens.**, 19-52, (1991).
78. Parusov, V. V., Sychkov, A.B., Zhigarev, M. A., Perchatkin, A. V., “Wire rod of boron-bearing low-carbon steel for direct deep drawing”, **Metallurgist**, 48, 68-73, (2004).
79. Hughes, J. D. H., Rogers, G. T., “High-resolution “autoradiography of trace boron in metals and solids”, **Journal of Institute of Metals**, 95, 299-302, (1967).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇARBOĞA, Cemal
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 28.06.1977 Gemerek
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 505 567 19 17
 Faks : 0 (312) 687 82 36
 e-mail : ccarboga@hotmail.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi Fen Bil. Ens./Metal Eğitimi	2002
Lisans	Gazi Üniversitesi Tek. Eği Fak./Metal Eğitimi	1999
Lise	Gemerek Endüstri Meslek Lisesi	1994

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1999-	Milli Eğitim Bakanlığı	Metal İşl. Öğr.

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. ÇARBOĞA, C., İMER, S., İNEM, B., “Ç1020 Çeliğinden % 03 - 0,4 Bor İçeren Master Alaşımı Üretimi ve Kullanımı”, *IV. Uluslararası Bor Sempozyumu*, ss. 89-94, Ekim 2009.

Hobiler

Masa Tenisi, Bilgisayar, Futbol, Satranç