

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI BİLEŞİMLERE SAHİP ÇELİKLERİN BORLAMA İŞLEMİ İLE YÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisi Filiz TAŞTAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30.06.2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 13.07.2010

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Salim ŞAHİN

**Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Mustafa TOPARLI (DEÜ)
Doç. Dr. Hakan ÇETİNEL (CBÜ)**

MANİSA 2010

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	ii
TABLO LİSTESİ.....	vii
TEŞEKKÜR	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. BOR ELEMENTİ	2
2.1. Bor Ürünleri.....	3
2.1.1. Ham Bor Ürünleri	3
2.1.2. Rafine Bor Ürünleri.....	4
2.1.3. Uç Bor Ürünleri	5
2.2. Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları.....	6
3. BORLAMA	9
3.1. Borlama Yöntemleri.....	11
3.2.1. Katı ortamda borlama yöntemi.....	11
3.2.2. Sıvı ortamda borlama yöntemi.....	14
3.2.3. Gaz ortamda borlama yöntemi	15
3.2.4. Plazma borlama	15
4. BORÜR TABAKASI.....	17
4.1. Borür Tabakası Oluşumu.....	17
4.2. Borür Tabakası Özellikleri	18
4.2.1. Tabaka Kalınlığı	18
4.2.2. Sertlik	19
4.2.3. Aşınma	20
4.2.4. Korozyon	21
4.2.5. Alaşım Elementlerinin Etkisi	21
4.2.6. Kırılma Tokluğu.....	22
5. VİCKERS İNDENTASYON TESTİ	23
6.DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	27
6.1. Malzeme Seçimi.....	27
6.2. Borlama	27
6.3. Metalografik Analiz.....	28
6.4. Mikro Sertlik	29

6.5. Korozyon Deneyi.....	29
6.6. Kırılma Tokluğu Ölçümü.....	29
7. DENEY SONUÇLARI.....	31
7.1. Mikro yapı.....	31
7.2.Tabaka Kalınlıkları.....	39
7.3. Sertlik Ölçümü.....	50
7.4. Korozyon Deneyi.....	52
7.5. Kırılma Tokluğu.....	63
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR.....	68

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Kristal bor, b) amorf bor ve c) amorf borun özellikleri (Beatty, 2006)	2
Şekil 3.1. Demir Bor Denge Diyagramı (Kubaschewki, 1982).....	10
Şekil 3.2.1.1. Numune kutusunun hazırlanması, b) Numunenin fırınlanması (Barış, 2007)	13
Şekil 3.2.3.1. Gaz borlama ünitesi (Barış, 2007)	15
Şekil 4.1.1. Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması (Bayça ve diğerleri,2004) ...	17
Şekil 4.1.2. Tek fazlı FeB tabakası, b) Tek fazlı Fe ₂ B tabakası, c) Geçiş bölgesi, d) Çift fazlı FeB+Fe ₂ B tabakası.	18
Tablo 4.2.2.1. Çeşitli metallerde elde edilen borür fazları ve mikro sertlikleri (ASM Handbook Komitesi, 1991).....	20
Şekil 4.2.5.1. Alasım Elementlerinin Borlama Sırasındaki Hareket Yönü (Uluköy, 2005)	22
Şekil 5.1. Vickers iz çatlaklarının gelişimi (Munz, 1999)	24
Şekil 5.2. Medyan ve Palmqvist çatlağı (Barsoum, 1996).....	25
Şekil 6.2.1. a) Numuneler borlanmadan önce, b) Borlama sırasında, c) Borlama kutusu ve borlama ortamı, d) Borlanmış numuneler.....	28
Şekil 6.3.1. Borlanmış numunelerin soğuk kalıplama işleminden sonra aşındırılmış görüntüleri	28
Şekil 6.6.1. a) FeB tabakasında b) Fe ₂ B tabakasında 2,94 N yükü oluşturulmuş iz ve çatlak görüntüsü.....	30
Şekil 7.1.1. 820°C' de 2 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.	31
Şekil 7.1.2. 820°C' de 4 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları	32
Şekil 7.1.3. 820°C' de 6 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve AISI 2344 çelikleri ait iç yapı fotoğrafları.	32
Şekil 7.1.4. 820°C' de 8 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI 2344 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.	33
Şekil 7.1.5. 860°C' de 2 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.	33
Şekil 7.1.6. 860°C' de 4 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 2344 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.	34
Şekil 7.1.7. 860°C' de 6 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.	34
Şekil 7.1.8. 860°C' de 8 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.	35

Şekil 7.1.9. 900°C' de 2 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.	35
Şekil 7.1.10. 900°C' de 4 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.	36
Şekil 7.1.11. 900°C' de 6 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.	36
Şekil 7.1.12. 900°C' de 8 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.	37
Şekil 7.1.13. 940°C' de 2 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.	37
Şekil 7.1.14. 940°C' de 4 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.	38
Şekil 7.1.15. 940°C' de 6 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.	38
Şekil 7.1.16. 940°C' de 8 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.	39
Şekil 7.2.1. 820°C sıcaklıkta a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat d) 8 saat süreyle borlanmış çeliklerdeki FeB tabakası ve toplam tabaka kalınlığı değişimi.	40
Şekil 7.2.2. 860°C sıcaklıkta a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat d) 8 saat süreyle borlanmış çeliklerdeki FeB tabakası ve toplam tabaka kalınlığı değişimi.	41
Şekil 7.2.3. 900°C sıcaklıkta a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat d) 8 saat süreyle borlanmış çeliklerdeki FeB tabakası ve toplam tabaka kalınlığı değişimi.	42
Şekil 7.2.4. 940°C sıcaklıkta a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat d) 8 saat süreyle borlanmış çeliklerdeki FeB tabakası ve toplam tabaka kalınlığı değişimi.	43
Şekil 7.2.5. 2 saat borlama için malzeme sıcaklığına bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b) FeB tabakası değişimi.	44
Şekil 7.2.6. 4 saat borlama için malzeme sıcaklığına bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b) FeB tabakası değişimi.	44
Şekil 7.2.7. 6 saat borlama için malzeme sıcaklığına bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b) FeB tabakası değişimi.	45
Şekil 7.2.8. 8 saat borlama için malzeme sıcaklığına bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b) FeB tabakası değişimi.	45
Şekil 7.2.9. AISI 1020 için sıcaklık-borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b) FeB tabakası değişimi.	46
Şekil 7.2.10. AISI 1040 için sıcaklık-borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b) FeB tabakası değişimi.	46

Şekil 7.2.11. AISI 4140 için sıcaklık-borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.	47
Şekil 7.2.12. AISI H13 için sıcaklık-borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.	47
Şekil 7.2.13. 820°C' de malzeme ve borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.	48
Şekil 7.2.14. 860°C' de malzeme ve borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.	48
Şekil 7.2.15. 900°C' de malzeme ve borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.	49
Şekil 7.2.16. 940°C' de malzeme ve borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.	49
Şekil 7.3.1. 820 °C sıcaklıkta 8 saat süreyle borlanan malzemelerin borlama süresine bağlı sertlik değişimleri	51
Şekil 7.3.2.860 °C sıcaklıkta 8 saat süreyle borlanan malzemelerin borlama süresine bağlı sertlik değişimleri	51
Şekil 7.3.3. 900 °C sıcaklıkta 8 saat süreyle borlanan malzemelerin borlama süresinebağlı sertlik değişimleri	52
Şekil 7.3.4. 940 °C sıcaklıkta 8 saat süreyle borlanan malzemelerin borlama süresinebağlı sertlik değişimleri	52
Şekil 7.4.1. 3 gün boyunca asit ortamında bekletilen borlanmamış a) AISI 1040 b) AISI H13 c) AISI 4140 çeliklerinin yüzey görünümleri.	53
Şekil 7.4.2. 3 gün boyunca asit ortamında bekletilen 860 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle borlanmış a) AISI 1040 b) AISI H13 c) AISI 4140 çeliklerinin yüzey görünümleri.	54
Şekil 7.4.3. 3 gün boyunca asit ortamında bekletilen 860 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle borlanmış a) AISI 1040 b) AISI H13 c) AISI 4140 çeliklerinin yüzey görünümleri.	54
Şekil 7.4.4. 3 gün boyunca asit ortamında bekletilen 900 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle borlanmış a) AISI 1040 b) AISI H13 c) AISI 4140 çeliklerinin yüzey görünümleri.	55
Şekil 7.4.5. 3 gün boyunca asit ortamında bekletilen 900 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle borlanmış a) AISI 1040 b) AISI H13 c) AISI 4140 çeliklerinin yüzey görünümleri.	55
Şekil 7.4.6.14 gün boyunca su ortamında bekletilen borlanmamış a) AISI 1040 b)AISI H13 c) AISI 4140 çeliğinin yüzey görünümü.....	56
Şekil 7.4.7. 14 gün boyunca a) asit b) su ortamında bekletilen 900 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle borlanan AISI 1040 çeliğinin yüzey görünümü.	56
Şekil 7.4.8. 14 gün boyunca a) asit b) su ortamında bekletilen 900 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle borlanan AISI H13 çeliğinin yüzey görünümü.....	57

Şekil 7.4.9. 14 gün boyunca a) asit b) su ortamında bekletilen 900 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle borlanan AISI 4140 çeliğinin yüzey görünümü.	57
Şekil 7.4.10. AISI 1040 çeliğinin a) su b) asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.	59
Şekil 7.4.11. AISI 4140 çeliğinin a) su b) asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.	59
Şekil 7.4.12. AISI H13 çeliğinin a) su b) asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.	60
Şekil 7.4.13. Borlanmamış çeliklerde su ve asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.	60
Şekil 7.4.14. 860 °C sıcaklıkta ve 2 saat boyunca borlanmış çeliklerde su ve asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.	61
Şekil 7.4.15. 860 °C sıcaklıkta ve 4 saat boyunca borlanmış çeliklerde su ve asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.	61
Şekil 7.4.16. 900 °C sıcaklıkta ve 2 saat boyunca borlanmış çeliklerde su ve asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.	62
Şekil 7.4.17. 900 °C sıcaklıkta ve 4 saat boyunca borlanmış çeliklerde su ve asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.	62
Şekil 7.5.1. 8 saat süreyle borlanan AISI 1020 çeliğinin a) Medyan tip çatlığa göre b) Palmqvist tip çatlığa göre hesaplanan kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.	64
Şekil 7.5.2. 8 saat süreyle borlanan AISI 1040 çeliğinin a) Medyan tip çatlığa göre b) Palmqvist tip çatlığa göre hesaplanan kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.	64
Şekil 7.5.3. 8 saat süreyle borlanan AISI 4140 çeliğinin a) Medyan tip çatlığa göre b) Palmqvist tip çatlığa göre hesaplanan kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.	65
Şekil 7.5.4. 8 saat süreyle borlanan AISI H13 çeliğinin a) Medyan tip çatlığa göre b) Palmqvist tip çatlığa göre hesaplanan kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.	65
Şekil 7.5.5. 8 saat süreyle borlanan çeliklerdeki borür fazı FeB 'nin a) Medyan tip çatlığa göre b) Palmqvist tip çatlığa göre hesaplanan kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.	66
Şekil 7.5.6. 8 saat süreyle borlanan çeliklerdeki borür fazı Fe ₂ B 'nin a) Medyan tip çatlığa göre b) Palmqvist tip çatlığa göre hesaplanan kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.	66

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.2.1. Bor ürünlerinin kullanım sektörleri	6
Tablo 4.2.2.2. Çeşitli metallerde elde edilen borür fazları ve mikro sertlikleri (ASM Handbook Komitesi, 1991).....	20
Tablo 6.1.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimi (% ağırlık).....	27
Tablo 6.5.4. Korozyon deneyinde kullanılan asit çözeltisinin bileşimi.....	29
Tablo 7.5.5. Kırılma tokluğu hesabı için ölçülen değerler.	63

TEŞEKKÜR

Çalıőma konusunun tespitini ve yürütölmesini sağlayan, bilgi ve deneyimlerini esirgemedten paylaőan danıőman hocam Sayın Doç. Dr. Salim Şahin' e katkılarında dolayı teşekkür ederim.

Deneyimlerini paylaőtđđı için Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerinden Sayın Doç. Dr. Mustafa Toparlı 'ya, sabır ve desteklerinden dolayı Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlileri Gözde Değer, Seda Kırmacı ve Selda Akgün 'e ve diğer çalıőma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, çalıőma süresince maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve tüm sıkıntılarını aşamamda gösterdikleri çabalar için aileme bir borç bilerek sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Günümüzde makine elemanlarının yüzeylerinin korunması ve uzun ömürlü olması için geliştirilen yöntemlerden biri borlamadır. Borlama yöntemiyle elde edilen yüzeyler yüksek sertlik, korozyon ve aşınma direnci ile sanayi uygulamalarında fayda sağlamaktadır.

Bu çalışmada AISI 1020, AISI 1040, AISI 4140 ve AISI H13 çeliklerinin borlama işlemiyle kaplanan yüzeylerin korozyon ve kırılma davranışları incelenmiştir. 820 °C, 860 °C, 900 °C ve 940 °C sıcaklıkta ve 2, 4, 6 ve 8 saat süreyle borlama yapılarak oluşturulan borür tabaka kalınlıkları ölçülmüştür. Süreyle ve sıcaklıkla kalınlık ilişkisi, çelik bileşimlerinin kalınlıkla bağlantısı araştırılmıştır.

860 °C ve 900 °C sıcaklıkta 2 ve 4 saat süreyle borlanan AISI 1040, AISI 4140 ve AISI H13 çeliklerinin H₂SO₄ çözeltisi (%10) ve yapay deniz suyunda 21 gün bekletilerek kütle kayıpları takip edilerek korozyon davranışları incelenmiştir. Borür tabakasına ortamdaki sıvının nasıl etki ettiği araştırılmıştır.

Ayrıca Vickers indentasyon yöntemi ile borür tabakalarının (FeB ve Fe₂B) kırılma toklukları hesaplanmıştır. 8 saat süreyle 860 °C, 900 °C ve 940 °C sıcaklıkta borlanan bütün çeliklerdeki borür tabakalarının kırılma tokluklarının sıcaklıkla ve borür fazı ile nasıl değiştiği incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Borlama, H₂SO₄ çözeltisi, Korozyon, Kırılma Tokluğu, Vickers İndentasyon, Yapay Deniz Suyu.

ABSTRACT

Today boriding is one of the using methods because the surfaces of machine components protect and their life is long. Boriding surfaces have advantages in industrial applications such as high hardness, corrosion and wear resistance.

In this study, surfaces coating by boronizing process were examined corrosion and fracture behavior in AISI 1020, AISI 1040, AISI 4140 and AISI H13 steels. The boronizing process was performed in 820, 860, 900, 940 °C and 2, 4, 6, 8 hours. So the thicknesses of borides were measured.

AISI 1020, AISI 1040 and AISI H13 steels boriding in 860, 900 and 2,4 hours were investigated their corrosion behavior by following weight loss. Steels were stayed in H₂SO₄ solution (vol. 10 %) and artificial seawater during 21 days. It was researched how liquids in media affected boride layers.

Also the fracture toughnesses of boride layers (FeB and Fe₂B) were calculated via Vickers Indentation technique. It was analyzed how the fracture toughnesses of boride layers in all steels boriding in 860, 900, 940 in 8 hour changed with temperature and boride layers.

Keywords: Boriding, H₂SO₄ solution, Corrosion, Fracture Toughness, Vickers Indentation, Artificial seawater.

1. GİRİŞ

Borlama, demir esaslı malzemelere, demir dışı malzemelere ve toz metalürjisi ile üretilen malzemelere çok geniş bir alanda uygulanabilen bir termo-kimyasal yüzey sertleştirme işlemidir. Yüksek sıcaklıkta bor atomlarının yüzeye difüzyonu ile gerçekleşen bu işlemin diğer yöntemlere göre avantajları elde edilen yüksek sertlik değeri, yüksek oksidasyon direnci ve yüksek abrasiv aşınma dayanımıdır. Ortamdaki bor atomlarının malzeme yüzeyine sıcaklıkla beraber difüzyon olması ile meydana gelmektedir. Tüm çeliklere, nikel alaşımlarına, titanyum alaşımlarına ve sinterlenmiş karbürlere başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. (Matuschka, 1980)

Demir alaşımları içerisinde bor atomları daha kolay difüze olurlar ve bu difüzyon, bor atomlarının hareket edebilme özelliği ve nispeten küçük boyutu ile açıklanır. Çeliklerde borlama işlemi ile yüzeyde FeB ve Fe₂B (demir borür) bileşikleri oluşmaktadır. Proses sıcaklığına bağlı olarak, malzemenin kimyasal içeriği, ortalama bor miktarı ve borlama zamanı, tek Fe₂B ya da çift intermetalik faz (FeB, Fe₂B) metalik malzemelerin, yüzey içine bor atomları difüze olarak elde edilmiştir. (Bindal ve diğerleri, 1999). Bu yapılar seramik malzemelerde gözlenen aşırı yüksek sertliklere ulaşmakla beraber diğer metaller gibi ısı ve elektrik iletkenliği de sağlamaktadır. Korozyon ortamında koruyucu kaplama olan demir borür yüksek ergime sıcaklığına sahiptir. (Palombarini et al, 1987). Aşınmaya karşı dayanımın fazla olması da bu işlemin avantajını çoğaltmıştır.

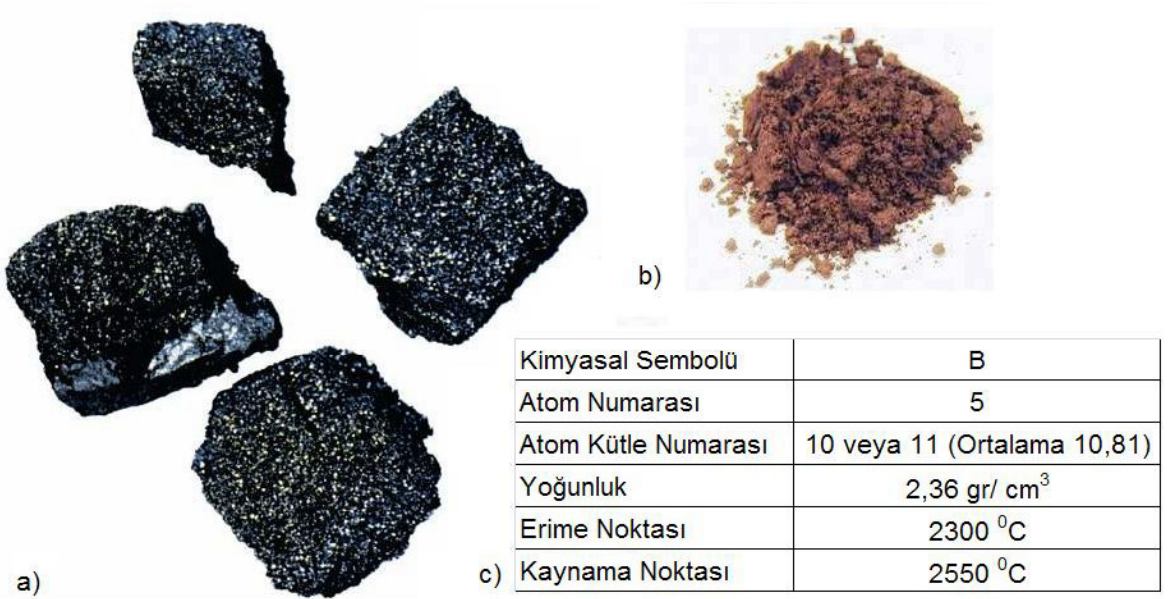
Borlama ortamı, bor kaynağı, aktivatörler, dolgu ve deoksidanlardan oluşmaktadır. Aktivatörler borür tabakasının düzenli gelişmesine etki ederler. Dolgu malzemesi ve deoksidantlar ise borlama esnasında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluştururlar ve borlama malzemesinin ana malzemeye yapışmasını önlerler. Borlama işlemi esnasında kullanılan yöntem, Borlama malzemesinin bileşimi, borlanacak malzeme cinsi, işlem süresi ve işlem sıcaklığı elde edilen tabakaya etki eden faktörlerdir. Genel olarak çelik borlama ortamında 850 - 1000 °C sıcaklıkta 2-8 saat bekletilerek borlama gerçekleştirilir. Borlama dört ana grupta incelenmektedir. Bunlar; katı, sıvı, gaz ve pasta(macun) halinde bor verici ile yapılan borlama ortamlardır. (Baştürk ve diğerleri, 2006). Katı halde borlama düşük maliyet, basit ekipman, toz bileşimine ilişkin esneklik, kolay uygulanabilirliği açısından diğer yöntemlere göre bazı avantajları vardır. (Meriç ve diğerleri, 2000).

2. BOR ELEMENTİ

Bor, periyodik tabloda B simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 olan metalle ametal arası yarı iletken özelliğe sahip bir elementtir. Bor tabiiatta hiçbir zaman serbest halde bulunmaz. Doğada yaklaşık 230 çeşit bor minerali olduğu bilinmektedir. Borun kristal ve amorf yapıları iki oluşumu vardır. Kristal bor parlak siyah renkte, amorf bor ise kahverengi toz halinde Şekil 2.1’ de gösterilmiştir. (Beatty, 2006)

Çeşitli metal veya ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin gösterdiği farklı özellikler, endüstride birçok bor bileşiğinin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bor, bileşiklerinde metal dışı bileşikler gibi davranır, ancak, farklı olarak saf bor, karbon gibi elektrik iletkenidir. Kristalize bor, görünüm ve optik özellikleri açısından elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir (Beatty, 2006).

Borun saf elementi ilk kez 1808 yılında Fransız kimyager J.L. Gay-Lussac ve Baron L.J. Thenard ile İngiliz kimyager H. Davy tarafından elde edilmiştir.



Şekil 2.1. Kristal bor, b) amorf bor ve c) amorf borun özellikleri (Beatty, 2006)

Bor cevherlerinin Türkiye’de en çok bulunduğu yerler Uludağ’ın güneyine çizilecek büyük bir yarım dairenin içinde kalır. Bor yatakları, Eskişehir/Kırka, Kütahya/Emet, Balıkesir/Bandırma, Kestelek, Hisarcık, Bigadiç, Susurluk- Sultansazlığı ile sınırlanmaktadır. Bu bölge aynı zamanda dünya bor cevherlerinin de % 70’ini bünyesinde barındırır. Türkiye’nin

bugüne kadar bulunmuş bor rezervleri (B_2O_3) bazında toplam 2.064 milyon ton olup şu anki tüketim hızıyla dünyaya 700 yıl yetecek kadardır. (Şimşek, 2005)

2.1. Bor Ürünleri

Endüstride kullanılan bor ürünleri, üretim aşamaları ve prosesleri ile kullanım alanları dikkate alınarak ham, bor ve rafine bor ürünleri ve uç ürünler şeklinde 3 gruba ayrılmıştır. (Acarkan, 2002)

2.1.1. Ham Bor Ürünleri

Dünyada üretilen bor cevherlerinin hemen hemen tamamı bir zenginleştirme işleminden sonra, ya parça ya da öğütülmüş konsantre halinde pazarlanır ve kullanılır. Bu tür ürünler ham bor olarak tanımlanabilmektedir. Ham bor ürünlerinin mineral yapısı ve üretildikleri yerler Tablo 2.1.1.1 'de verilmiştir.

Tablo 2.1.1. 1. Ham Bor Ürünleri

Ürünün Adı	Formülü	Bulunduğu Yer
Tinkal Konsantre	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	Türkiye, ABD, Arjantin
Üleksit Konsantre	$NaCaB_5O_9 \cdot 5H_2O$	Türkiye, ABD, Arjantin
Kolemanit Konsantre	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$	Türkiye, ABD, Arjantin, Şili
Hidroborasit konsantre	$CaMgB_6O_{11} \cdot 6H_2O$	Türkiye, Arjantin
Szaybelit Konsantre	$MgBO_2(OH)$	Kazakistan, Çin

Ham bor ürünleri %90 dolayında borik asit, boraks penta ve dekahidrat gibi rafine bor ürünleri üretiminde kullanılmaktadır. Bunun yanısıra, çeşitli amaçlara yönelik cam elyafı, borosilikat cam, nükleer uygulamalar ve metalürjide kullanılmaktadır. Özellikle borlu çelik, çelik yapımında kolemanid, çelik üretiminde fluorit yerine üleksit ve kolemanit tercih edilmeye başlanmıştır. (Acarkan, 2002)

2.1.2. Rafine Bor Ürünleri

Rafine bor ürünlerinin temel kullanım alanları olarak, cam elyafı, sabun ve deterjan, seramik, yangın geciktirici gereçler, tarım ve nükleer uygulamalar, metalurji, ilaç ve kozmetik, elektronik ve bilgisayar sanayi dalları sayılabilir. Rafine bor ürünleri borun en çok tüketilen türevlerini oluşturmaktadır.

Rafine Bor ürünleri şunlardır (Uzun, 2002):

a. Boraks Dekahidrat: Teknolojik olarak alkali metal boratlarının en önemlilerinden biri, disodyum tetraborat dekahidrat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) olarak da adlandırılan boraks dekahidrattır ve tabiatta tinkal minerali olarak bulunur. Molekül ağırlığı 381,4 gr./mol, özgül ağırlığı 1,71 (20°C), özgül ısı 0,385 kcal/gr/°C (25-50°C), oluşum ısı $-1497,2$ kcal/mol' dür. Renksiz monoklinik kristal yapısında bir tuzdur. Sulu çözeltileri yaklaşık, konsantrasyondan bağımsız olarak hafif alkali reaksiyon gösterir. (pH=9,2). Doymuş boraks çözeltisi 105°C' de kaynar.

b. Boraks Pentahidrat: Disodyum tetraborat pentahidratın ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) molekül ağırlığı 291,35 gr/mol, özgül ağırlığı 1.88, özgül ısı 0,316 kcal /gr/°C ve oluşum ısı $-1143,5$ kcal/mol' dür. Mineral adı tinkalkonit olan pentahidrat boraksın dehidrasyonundan oluşan birikintiler halinde bulunur. Doymuş boraks çözüntüsünün 60°C' nin üzerinde kristallenmesi ile oluşur.

c. Susuz Boraks: Disodyum tetraborat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) molekül ağırlığı 201,27 gr/mol, özgül ağırlığı 2,3, oluşum ısı $-783,2$ kcal/mol olan renksiz ve çok sert bir kristaldir. Kolay öğütülebilir kristalin bir kütle olarak bulunur. Ergime derecesi 741°C' dir. Higroskopiktir. Boraks hidratların 600-700 °C' de dehidrasyonu ile stabil yapıda susuz boraks üretimi sağlanabilmektedir.

d. Borik Asit: Borik asit (H_3BO_3) molekül ağırlığı 61,83 gr/mol, B_2O_3 içeriği %56.3, ergime noktası 169 °C, özgül ağırlığı 1.44, oluşum ısı -1089 kJ/mol, çözünme ısı 22,2 kJ/mol olan kristal yapı bir maddedir. Oda sıcaklığında sudaki çözünürlüğü az olmasına rağmen, sıcaklık yükseldikçe çözünürlüğü de önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle sanayide borik asidi kristallendirmek için genellikle doymuş çözeltiyi 80°C' den 40°C' ye soğutmak yeterli olmaktadır. Bor minerallerinden geniş ölçüde üretilen borik asit başlıca; cam, seramik ve cam yünü sanayiinde kullanılmakta olup, kullanım alanları çok çeşitlidir. Borik asit, bor minerallerinin genel olarak sülfürik asit ile asitlendirilmesi ile elde edilmektedir. Türkiye'de borik asit üretimi başlıca; Bandırma'daki Eti Bor A.Ş. Boraks ve Asit Fabrika İşletmeleri tarafından yapılmaktadır.

e. Bor Oksit (susuz borik asit) : Ticari bor oksit, B_2O_3 'tür ve genellikle %1 su içerir. Genellikle borik asitten uygun sıcaklıkta su kaybettirilerek elde edilir. Renksiz cam görünüşlüdür. Oda sıcaklığında higroskopiktir. Bor oksit ve susuz boraks cam sanayinde çok kullanılır. Yüksek sıcaklıkta borik asitten su buharlaşırken B_2O_3 kaybı artmaktadır. Cam üretim prosesinde, borik asit yerine, bor oksit kullanılması enerji ve hammadde avantajı sağlamaktadır.

Bor oksit porselen sırlarının hazırlanmasında, çeşitli camlarda, ergitme işlemlerinde, seramik kaplamalarda kullanılır. Ayrıca pek çok organik reaksiyonun katalizörüdür. Pek çok bor bileşiğinde başlangıç maddesidir.

f. Sodyum Perborat: Sodyum perborat ($\text{NaBO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) genellikle tetrahidrat yapısındadır. Perborat üretiminde %33 B_2O_3 içeren boraks minerali kullanılmaktadır. Sodyum perborat, Bandırma 'daki Eti Bor A.Ş. Boraks ve Asit Fabrikaları İşletmeleri tarafından üretilmektedir. Sodyum perborat, ağartıcı etkisi dolayısıyla yaygın olarak sabun ve deterjan sanayisinde kullanılmaktadır. Ayrıca kozmetik maddelerin yapımında, tekstil endüstrisinde, mum, reçine, tutkal ve sünger sanayinde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır.

2.1.3. Uç Bor Ürünleri

Uç ürünler, ham ve rafine ürünlerden üretilirler. En önemli özellikleri teknoloji gerektiren yöntemler ile üretilmeleridir. Ham ve rafine bor ürünlerine göre üretilen uç ürün sayısı daha fazladır. Daha büyük oranda üretilip, tüketilen uç bor ürünleri elementel bor, bor karbür, bor nitrür ve bor alaşımları sayılabilir. (Acarkan, 2002)

a) Elementel Bor: Günümüzde askeri faaliyetler sırasında aydınlatma amacıyla kullanılmaktadır.

b) Bor Karbür: Uç ürünler içinde en çok kullanılanlardan biridir. Bu malzemenin en önemli özelliklerinden biri, elmadan sonra ikinci en yüksek sertliğe sahip olmasıdır. Yüksek sıcaklığa ve nötron absorpsiyon yeteneği vardır. Bu özellikleri sayesinde askeri araçları zırhlanmasında ve nükleer reaktörlerde kullanılır. (Acarkan, 2002)

Bor-karbon sistemindeki tek bileşik olan bor karbür, genellikle granül katı olarak elde edilir. Masif ürün olarak elde edilmek istendiğinde, 1800-2000 °C' de grafit kalıplarda preslenir. Saf bor karbür kristalleri hafif parlak görünümdedir. Yoğunluğu $2,52 \text{ gr/cm}^3$, ergime sıcaklığı 2450 °C' dir. Sıcak preslenmiş bor karbür, aşındırıcı parçalarda, contalarda, seramik zırlı yüzeylerin yapılmasında kullanılır. 2000 °C' nin üzerindeki sıcaklıkların ölçülmesinde termoçift olarak kullanılır. Sertliği nedeniyle abrasiv malzeme yapımında kullanılır. (Ediz ve Özdağ, 1997)

c) Bor nitrür: Hegzagonal ve kübik sistemde kristalleşen bir bileşiktir. Hegzagonal bor nitrür direnci olan ve yüksek ısıya dayanan bir bor türevidir. Toz halindeki hegzagonal bor nitrür yüksek sıcaklıklarda da yağlama malzemesi olarak geniş bir alanda kullanılmaktadır. Kübik bor nitrür elmas sertliğinde bir üründür. Suni elmas diye tanımlanabilmektedir. 1320 °C' ye kadar özelliklerini korur. Çeşitli tür aşındırıcılarla elmasın yerini almaya başlamıştır.

d) Ferrobor: Çeliği bor ile alaşımlandırma ve trafo çekirdeklerinde amorf malzeme olarak kullanılması en önemli kullanım alanını oluşturmaktadır. Nikelli çekirdeklerinde

kullanılmaktadır. Bu aşamalarda üretilen teller EKG gibi cihazların sensörlerinin üretiminde tercih edilmektedir. Sıcak preste üretilen TiB_2 , BN, B_4C kompozitleri başka malzemeleri sert TiBCN kompozitiyle kaplanmasında kullanılmaktadır.

2.2. Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları

Bor ürünlerinin kullanım sektörlerini Tablo 2.1.1'de maddeler halinde verilmiştir (Komisyon Bor Raporu, 2003).

Tablo 2.2.1. Bor ürünlerinin kullanım sektörleri

Savunma Sanayi	Zırh Plakalar, Seramik Plakalar, Ateşli Silah Namluları, Fişek vb
Cam Sanayi	Bor Silikat Camlar, Laboratuar Camları, Uçak Camları, Borcam, Pyrex, İzole Cam Elyafı, Tekstil Cam Elyafı, Optik Lifler, Cam Seramikleri, Şişe, diğer Düz Camlar, Otomotiv Camları vb.
Elektronik ve Bilgisayar Sanayi	Mikro Chipler, LCD Ekranları, CD-Sürücüler, Akım Levhaları, Bilgisayar Ağlarında; Isıya-Aşınmaya Dayanıklı Fiber Optik Kablolar, Yarı İletkenler, Vakum Tüpler, Dielektrik Malzemeler, Elektrik Kondansatörleri, Kapasitörler, Gecikmeli Sigortalar, Bataryalar, Laser Printer tonerleri vb.
Enerji Sektörü	Gaz türbinleri, Yüksek ısı transistörleri, Bor hidrür yakıtları(boranlar), Isı enerjisi depolayıcılar, Piller, Hidrojen depolayıcılar, Güneş Enerjisinin Depolanması, Güneş Pillerinde Koruyucu olarak, Hücre Yakıtları vb
Görüş Sistemleri	Kamera ve Mercek Camları, Fotoğraf Makinaları, Dürbünler, Banyo ve Film İmalatları
İlaç ve Kozmetik Sanayi	Dezenfekte Ediciler, Antiseptikler, Diş Macunları, Lens Solüsyonları, Kolonya, Parfüm, Şampuan vb
İletişim Araçları	Cep Telefonları, Modemler, Televizyonlar vb.
Kağıt Sanayi	Geri kazanılan kâğıtların mürekkeplerinden arındırılması, Yüksek kaliteli kâğıtların parlaklaştırılması, kâğıt hamurunu beyazlatılması,
Kimya Sanayi	Bazı kimyasalların indirgenmesi, Elektrolitik işlemler, Flotasyon İlaçları, Banyo Çözeltileri, Katalistler, Atık Temizleme Amaçlı olarak, Petrol Boyaları, Yanmayan ve Erimeyen Boyalar, Tekstil Boyaları, Yapıştırıcılar, Soğutucu Kimyasallar, Korozyon Önleyiciler, Mürekkep,

	Pasta ve Cilalar, Kibrit, Kireçlenme Önleyicileri, Dezenfektan kimyasallar, Kozmetikler, yumuşatıcılar, Sabun, Toz Deterjanlar, Toz Beyazlatıcılar, Ağartıcılar, Parlaticılar, Ahşap empenye çözeltileri, Mumyalama vb.
Koruyucu	Ahşap Malzemeler ve Ağaçlarda Koruyucu olarak, Boya ve vernik Kurutucularında, Küf ve mantar önleyiciler, vb.
Makine Sanayii	Manyetik Cihazlar, Zımpara ve Aşındırıcılar Kompozit Malzemeler, Titreşim söndürücü malzemeler, Sert malzemeler, Motorlar, Katı yağlayıcılar, Yüksek sıcaklık sızdırmazlık contaları, Yüksek performanslı motor yağları, vb.
Metalürji	Kaplama elemanları, Yüksek sıcaklık refrakterleri, Kaplama Sanayiinde Elektrolit Olarak, Paslanmaz ve Alaşımli Çelik, Sürtünmeye-Aşınmaya Karşı Dayanıkl Malzemeler, Kaynak Elektrotları, Metalurjik Flaks, Briket Malzemeleri, Lehimleme, Döküm Malzemelerinde Katkı Maddesi olarak, Kesiciler, Kompozit Malzemeler, Zımpara ve Aşındırıcılar vb.
Nükleer Sanayi	Nükleer atık depolama (kolemanit cam bloklar), Reaktör Aksamları, Nötron Emiciler, Reaktör Kontrol Çubukları, Nükleer Kazalarda Güvenlik Amaçlı ve Nükleer Atık Depolayıcı olarak, Nükleer teknolojide emniyet malzemeleri, vb.
Otomobil Sanayi	Titreşim söndürücü malzemeler, Hava yastığı şişirme mekanizmaları, Bor hidrür yakıtları (boranlar), Isı enerjisi depolayıcılar, Hidrojen depolayıcılar, Hava Yastıklarında, Hidroliklerde, Plastik Aksamda, Yağlarda ve Metal Aksamalarda, Isı ve Ses Yalıtımı Sağlamak Amacıyla, Antifrizler, vb.
Seramik Sanayi	Emaye, Fayans, Porselen Boyaları, sırlar, vb
Spor Malzemeleri	Kayak Aksamları, Tenis Raketleri, Ok-yay, Balık Oltaları, Golf Sopaları, Darbe söndürücüler vb.
Tarım Sektörü	Sentetik gübreler, Biyolojik Gelişim ve Kontrol Kimyasalları, Küf ve mantar önleyiciler, Böcek-Bitki Öldürücüler, Yabani Otlar, vb
Tekstil Sektörü	Isıya Dayanıkl Kumaşlar, Yanmayı Geciktirici ve Önleyici Selülozik Malzemeler, İzolasyon Malzemeleri, Tekstil Boyaları Deri Renklendiricileri, Dericilikte kireç çöktürücü, Suni İpek Parlatma

	Malzemeleri, vb.
Tıp	Yapay organlar, Antibiyotikler(boromicyn), Osteopoz Tedavilerinde, Alerjik Hastalıklarda, Psikiyatride, Kemik Gelişiminde ve Artirite, Menopoz Tedavisinde, BNTC Terapi Yöntemiyle Beyin Kanserlerinin Tedavisinde tümör öldürücüler, Manyetik Rezonans Görüntüleme Cihazlarında, vb
Uzay ve Havacılık Sanayii	Sürtünmeye-Aşınmaya ve Isıya Dayanıklı Malzemeler, Roket Yakıtı, Uydular, Uçaklar, Helikopterler, Zeplinler, Balonlar, Radar dalgası soğurucular, vb.

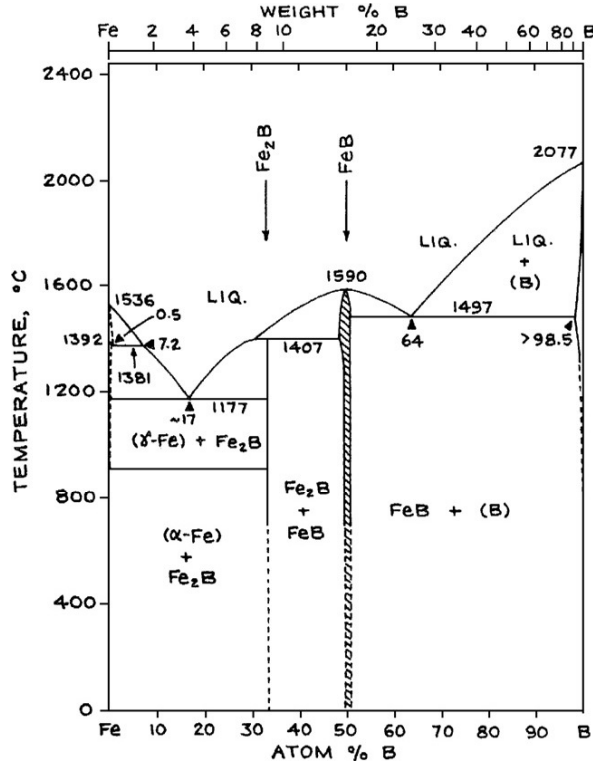
3. BORLAMA

1895 yılında Mossion, çeliklerin borlanabileceğini söylemiş ve bu konuda çalışmalar yapmıştır. Ancak özellikle II. Dünya Savaşı'ndan sonra bu konudaki araştırma ve çalışmalar yoğunluk kazanmıştır (Selçuk,1994).

Bir termo-kimyasal yüzey işlemi olarak tanımlanan borlama, ısı enerjisiyle parçanın yüzeyindeki metalik kafese bor atomlarının difüze olmasıdır. Difüze olan bor atomları malzeme ile tepkimeye girer ve çok sayıda borür oluşturur (Allaoui et al, 2006).

Bu yolla çelik yüzeyinde diş şeklinde demir borürler meydana gelmektedir. Demir-bor denge diyagramında ağırlıkça %8,83 bor oranında Fe_2B , yine ağırlıkça %16,23 bor oranında FeB ara bileşikler meydana gelmektedir. Ağırlıkça 3,8 bor oranında erime sıcaklığı $1149\text{ }^{\circ}C$ olan ötektik faz oluşmaktadır. (Şekil 3.1) Dolayısıyla borlanmış yüzey bu sıcaklığa kadar ısıdan etkilenmemektedir. Borlamada, bor verici olarak herhangi bir bor bileşiği kullanılabilir. Borlama ortamı diğer katkılarla birlikte katı, sıvı veya gaz halinde olabilir. Bu ortamlarda çeliklere bor difüzyonu ile genellikle yüzeyde tek fazlı Fe_2B (Demir Borür) tabakası elde edilmesi amaçlanır. Bu tabakanın elde edilmesi için uygun borlama ortamının bileşimi konusundaki araştırmalar hâlâ devam etmektedir.

Bor ile yapılan yüzey sertleştirmesinde, bor elementi tek başına kullanılmaz. Daha çok bor karbür(B_4C) veya borik asidin, aktivatör ve katkı maddelerinin karışımları ile yüzey sertleştirme yapılır. (Selçuk ve diğerleri, 2002)



Şekil 3.1. Demir Bor Denge Diyagramı (Kubaschewski, 1982)

Borlamanın avantajları; (Yapar ve diğerleri, 2002)

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

Borlamanın dezavantajları; (Yapar ve diğeri, 2002)

- Proses esnek olmayıp, daha çok itina ister ve bu da prosesi pahalı yapar.
- Borlama işlemi ile borlanan hacimde hacimce %5 – 25 'lik artış olmaktadır.
- Çok düşük tolerans isteklerinde borlanmış yüzey sadece elmas taşlama yoluyla sağlanır. Çünkü geleneksel yöntemler yüzeyde kırılmalara sebep olur. Bu yüzden kusursuz borlama işlemleri çoğunlukla geniş kesitli parçalara uygulanır.
- Genellikle borlanmış alaşımlı çelik parçaların yorulma özellikleri karbürleşmiş ve nitrürlenmiş çeliklerle karşılaştırıldığında çok zayıftır. Bu nedenle dişli üretiminde sınırlama söz konusudur.
- Borlamadan sonra genellikle parçanın vakum ya da yansız bir ortamda sertleştirilmesine ve temperlenmesine ihtiyaç duyulur. Bu sayede borür tabakasının bütünlüğü, sağlamlığı artırılır.

3.1. Borlama Yöntemleri

Borlama işleminin çeşitli uygulama yöntemleri vardır. Bu yöntemler aşağıdaki gibidir (Barış, 2007):

1. Katı ortamda borlama,

- Toz ortamda borlama (paket borlama),
- Macun ile borlama (pasta borlama),

2. Sıvı ortamda borlama,

- Daldırma yöntemi ile borlama,
- Elektroliz yöntemi ile borlama,

3. Gaz ortamda borlama

4. Plazma (iyon) borlama.

3.2.1. Katı ortamda borlama yöntemi

En yaygın olarak kullanılmakta olan yöntem, taban malzemesi üzerine bor veya boron karbid bileşiminde aktivatörlerle paketlenmesiyle yapılan borlamadır. Metot yalnızca küçük boyutlu parçalara uygulanabilmektedir (Karakan ve diğeri, 2002)

Katı borlama yönteminde kullanılan bor bileşikleri; borkarbür (B₄C), ferrobor, elementer bordur. Bunlardan en çok kullanılanı, borkarbürdür. Aktivatör olarak sodyum bor florür (NaBF₄), potasyum bor florür (KBF₄), baryum florür (BaF₂), sodyum karbonat (Na₂CO₃), amonyum klorür

(NH₄Cl) ve redükleyici olarak silisyum karbür, grafit ve sodyum klorür gibi maddeler kullanılır. (Barış, 2007)

Borlama maddesinin tane boyutu küçüldükçe temas yüzeyi artar. Temas yüzeyinin artması yayılımı kolaylaştırır, dolayısıyla borür tabakasının kalınlığı artar. Borlama kaynağı olarak kullanılan bazı toz karışımlar aşağıda verilmiştir: (Barış, 2007)

- %5 B₄C, %90 SiC, %5 KBF₄
- %50 B₄C, %45 SiC, %5 KBF₄
- %85 B₄C, %15 Na₂CO₃
- %95 B₄C, %5 Na₂B₄O₇
- %84 B₄C, %16 Na₂B₄O₇
- Amorf bor (%95-97), % (3-5) KBF₄
- %(40-80) B₄C, %(20-60) Fe₂O₃
- %60 B₄C, %5 B₂O₃, %5 NaF, %30 demir oksit
- %50 amorf bor, %1 NH₄F.HF, %49 Al₂O₃
- %100 B₄C
- %20 B₄C, %5 KBF₄, %75 Grafit
- %95 amorf bor, %5 KBF₄
- %95 B₄C, %5 NaF
- %80 B₄C, %20 Na₂CO₃

Ticari alanda katı ortam borlama maddeleri kullanım alanlarına göre sınıflanılarak satılmaktadır. (Şimşek, 2005) Bunlar şöyledir:

Ekabor 1: Tozdur. Optimum tabakanın elde edilmesinde kullanılır. Yüzey pürüzlülüğü açısından yüksek kaliteye erişilir ve genel maksatlı, demir ve çelik malzemelerde kullanılır.

Ekabor 2: Granüldür. Yüzey pürüzlülüğü açısından çok yüksek kaliteye sahiptir. Düşük alaşımlı çelikler için kullanılır.

Ekabor 3: Granüldür. Ekabor 2'den daha iri taneli olup yüzey kalitesi daha iyidir. Yüksek alaşımlı çelikler için kullanılır.

Ekabor HM: Sert malzemelerin borlanması için özel olarak üretilmiştir.

Ekabor Pasta: Macun şeklinde olup metalik malzemelerin borlanması istenen bölgelerine sürülerek uygulanır.

Katı ortamda borlamanın avantajları: (Barış, 2007)

- Sistem ucuzdur.
- Özel teknik gerektirmez.
- Borlama tozları diğer borlama yöntemlerine göre daha kolay elde edilebilir.
- Toz terkihi değiştirilebilir.
- Minimum ekipman ve düşük maliyet gerektirir.

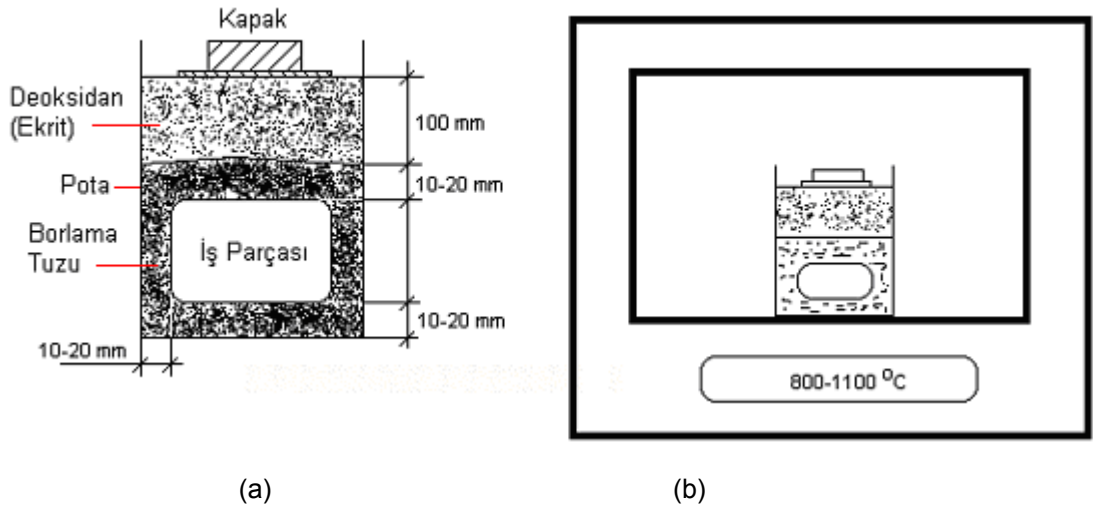
Katı ortamda borlamanın dezavantajı: (Barış, 2007)

- Yüzeyde bor bileşimi homojen değildir.

Katı ortamda borlama yöntemi 2 farklı şekilde yapılmaktadır:

Toz ortamda borlama:

Yüzeyi borlanacak malzeme toz halindeki ortam içinde 800-1000 °C sıcaklıklarda 4-10 saat bekletilerek borlama işlemi yapılır. Isıya dayanıklı kutu içinde bulunan toz ortama parça gömülür (Şekil 3.2.1.1). Borlanacak parça sayısı da göz önüne alınarak parçaların tüm yüzeylerinde en az 10 mm kalınlığında bir toz yığını olacak şekilde düzenleme yapılmalıdır. Kutuların ağzı bir kapak ile kapatılarak fırın içi sıcaklığı borlama sıcaklığına getirilip borlama süresi sonunda kutu fırından alınarak soğumaya terk edilir. Bundan sonra parça kutu içerisinden çıkarılır. Eğer işlem normal atmosferde yapılacak ise, kapak sıkıca kapatılmalıdır. Ancak bu durumda da kapak kutuya kaynayabilir. Yöntem ucuz olup özel bir teknik gerektirmez. (Yıldızlı, 2002)



Şekil 3.2.1.1. Numune kutusunun hazırlanması, b) Numunenin fırınlanması (Barış, 2007)

Macun Borlama:

Kutu borlamanın zor ve pahalı olduğu veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda yine katı borlama yöntemi olarak kabul edilen macun ile borlama yöntemi kullanılır. Karmaşık şekilli parçaların tamamen veya kısmen borlanması borlama pastası ile yapılabilir. (Barış, 2007).

Borlama için kullanılacak tozlar macun haline getirilir ve borlanacak parçanın üzerine 2 mm kalınlıkta sürülür. Parça yüzeyine sürülen macun derhal sıcak hava akımında, ön ısıtma odasında veya kurutma fırınında maksimum 150 °C' de kurutulması gerekir. Gerekli takdirde macun üzerine tekrar birkaç kez daha sürülebilir. Kurutma işleminden sonra macun ile kaplanmış parçalar önceden ısıtılmış fırına konur ve fırın ağzı kapatılarak borlama sıcaklığına ısıtılır. Belirli süre bu sıcaklıkta tutulan parçalar dışarı alınır. Ve soğumaya terk edilir. Parçalar soğuduktan sonra yüzeyinde yapışmış olan artıklar temizlenir ve böylece borlama yapılmış olur (Şimşek, 2005).

3.2.2. Sıvı ortamda borlama yöntemi

Bor bileşikleri, aktivatör ve redükleyici maddelerden oluşan ergimiş tuza, iş parçasının daldırılması yöntemidir. Daldırma süresi borlama süresidir. Borlama sırasında elektrik akımı uygulanıyorsa elektrolitik borlama (elektroliz yöntemi ile borlama), uygulanmıyorsa normal sıvı ortamda daldırma yöntemi ile borlama ismini alır. Borlama işlemi 800 - 1000 °C sıcaklıkta ve 2 - 9 saat süre ile yapılır. Bu yöntemin dezavantajı sıcaklıktır. Sıcaklığın 850 °C 'nin altına düşmesi durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalacağından borlama imkansız hale gelecektir. (Barış, 2007).

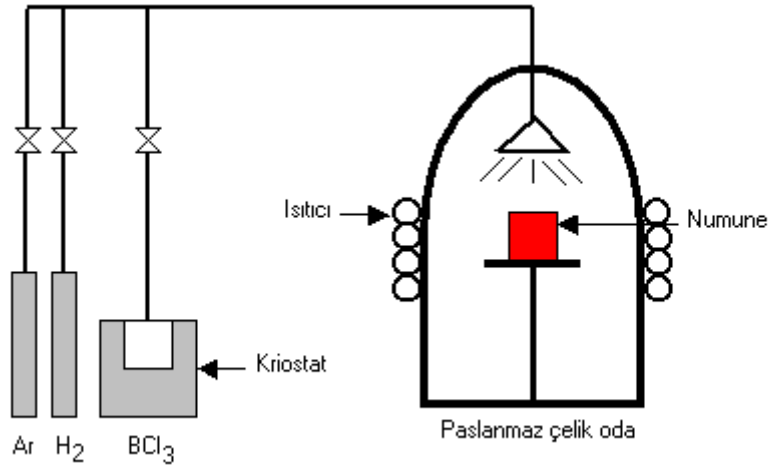
İşlemden önce susuz boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), susuz borik asit (B_2O_3), metaborik asit (HBO_2), boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), bor karbür (B_4C) gibi bor bileşikleri kullanılır. Silisyum karbür, ferrosilisyum, grafit, NaCl, Al gibi redükleyiciler kullanılır. Borlayıcı ortamın sıvı olması için bor bileşiklerinin veya NaCl gibi eriticilerin miktarı yüksek olmalıdır. Böylece eritici olan bu maddeler diğer maddeleri de eriterek sıvı eriyik oluşturur. (Barış, 2007)

Sıvı ortam borlaması sırasında borlanan metal ile redükleyici madde arasında galvanik pil oluşur. Aktif bor oluşumu sırasında metal yüzeyinde katodik bir reaksiyon olurken, redükleyici madde yüzeyinde anodik bir reaksiyon olmaktadır. Bu işlemin oluşması için; borlanacak metal ile redükleyici madde taneleri arasında elektrokimyasal farkın bulunması gerekir. Difüzyon reaksiyonu esnasında katot potansiyeli, yüzeyde oluşan fazın (FeB , Fe_2B) potansiyel değerini

alır. Katı eriyik, oluşum esnasında yüzeyde yayınan elementin konsantrasyonundaki değişimle birlikte sürekli değişir. (Ayter, 2005)

3.2.3. Gaz ortamda borlama yöntemi

Gaz ortamda borlamada, bor kaynağı olarak bor halojenürleri, diboran ve organik bor bileşikleri kullanılır. Gaz borlayıcıların en önemli üstünlüğü, gaz sirkülasyonunun sonucu olarak daha üniform bir bor dağılımının sağlanabilmesi ve elde edilmelerinin kolay olmasıdır. Prensip olarak gaz ortamda borlamada, bor potansiyelinin ayarlanabilmesinden dolayı, tek fazlı tabaka elde etmek mümkündür (Şimşek, 2005).



Şekil 3.2.3.1. Gaz borlama ünitesi (Barış, 2007)

Borlama işlemi Ar ve H₂ gazlarının ve bir evaportartörde gaz haline getirilmiş bir bor kaynağının (BCl₃ gibi) belirli karışımının, dış ortama kapalı paslanmaz çelik bir odadaki numune üzerine püskürtülmesiyle yapılır (Şekil 3.2.3.1). İşlem 700 – 950 °C sıcaklık aralığında ve 67 KPa (0,67 bar), 1:15 BCl₃+H₂ gaz karışımında gerçekleştirilmektedir (Barış, 2007).

3.2.4. Plazma borlama

Gaz ortamda 300-700 Pa basınçla borlama yapmak mümkündür. İşlem sıcaklığı diğer borlama yöntemlerine kıyasla düşmekte ve borlama süresi kısalmaktadır. Reaktif gazın daha iyi kullanımı ile işlem atmosferinde BCl₃ buharının miktarı azaltılır. Bu yöntemde işlenen parça

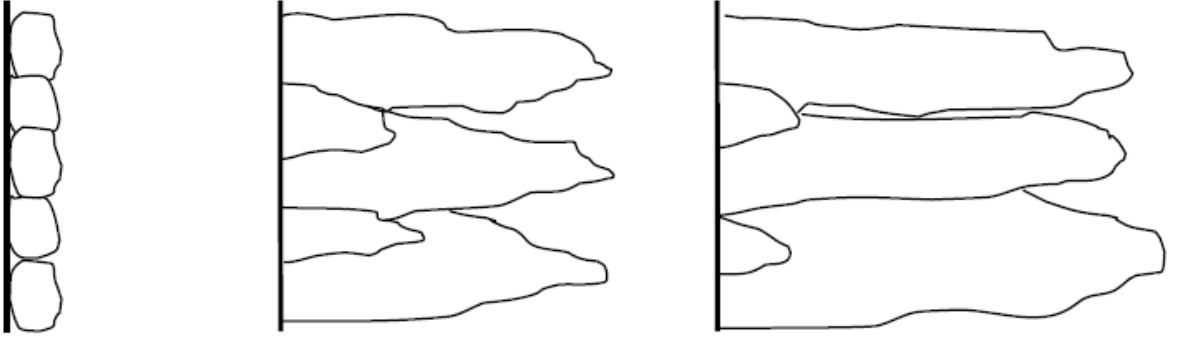
yüzeyinin aktiflenmesi katodik püskürtmeden dolayı (özellikle işlemin başlangıç aşamasında, yani ısınma esnasında) akkor ışık ile yapılır. (Nair, 1996)

Bu teknikle 200 mm kalınlığa varan borür tabakaları 700-850 °C sıcaklıklarda 6 saat borlama süresinde ve 270-800 Pa basınçta oluşturulabilir. İşlem süresinin ve sıcaklığının düşük olması, yüksek sıcaklık fırın ve ekipmanları gerektirmemesi, borür tabakası derinliği ve kompozisyonunun kontrol edilebilmesi, enerji ve gaz tüketiminin ekonomikliği gibi özelliklerine sahip bir borlama işlemidir. Çalışılan atmosferin zehirli olması ise işlemin en büyük dezavantajıdır. (Yıldızlı, 2002)

4. BORÜR TABAKASI

4.1. Borür Tabakası Oluşumu

Borlamanın birinci aşamasında borlayıcı ortam ve nesnenin yüzeyindeki reaksiyon partnerleri arasında reaksiyon oluşur. Taneler yüzeyde çekirdek oluşturmaktadır. Borlama süresi ile çekirdek oluşumu artar ve ince bir bor tabakası elde edilir. Bor, Fe_2B ve FeB yapısında çeliğin yüzeyine yayılır. Borlama işlemi sırasında, ilk borür çekirdeği numunenin yüzeyinde oluşmaktadır. (Şekil 4.1.1) (Bayça ve diğerleri, 2004)



Şekil 4.1.1. Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması (Bayça ve diğerleri,2004)

Oluşan ilk borür çekirdeği numune içinde büyür. Bor atomları kafes yapının 001 doğrultusunda daha hızlı yayıldığı için FeB ve Fe_2B 001 boyunca yönelir. Bu yüzden borür taneleri 001 yönünde yüzeye dik daha hızlı büyür. Borür tanelerinin diğer yönlerde büyümesi daha yavaştır. Bu nedenle kolonsal yapı oluşur. Önce Fe_2B fazı oluşur, ortamda yeterince bor konsantrasyonu varsa FeB fazı da oluşur. İlk önce oluşan Fe_2B fazı uzun bir sürede büyümektedir. Borür tabakaları çeliğin yüzeyinden içeriye doğru FeB_x , FeB , Fe_2B yapısında oluşur. Borlamanın son aşamasında sadece FeB fazı oluşur. FeB fazı Fe_2B fazından daha kısa sürede büyür. Bu yüzden FeB fazının dokusu Fe_2B fazı kadar güçlü değildir .

Borlama sırasında, bor atomlarının difüzyonu ile yüzeyde metal kafesi içerisinde bor bileşikleri oluşur. Bu tabaka tek fazlı veya çok fazlı borürlerden oluşabilir. Bor tabakasının şekli, büyüklüğü, oluşan fazların kompozisyonu ve bor tabakasının sertliği ana malzemenin kimyasal kompozisyonuna bağlıdır. Demir esaslı malzemelerin borlanması ile oluşan ferrobör tabaka çeşitleri Şekil 3.7 'de görülmektedir (Matuschka, 1980).



Şekil 4.1.2 Tek fazlı FeB tabakası, b) Tek fazlı Fe₂B tabakası, c) Geçiş bölgesi, d) Çift fazlı FeB+Fe₂B tabakası.

4.2. Borür Tabakası Özellikleri

Borür tabakasının karakteristik özelliği diş şeklinde bir yapıya sahip olmasıdır. Tabaka ve asıl malzeme arasındaki dişlenme derecesi işlem sıcaklığı ve süresinin yanı sıra alaşım elementlerinin miktarına da bağlıdır. Kuvvetli dişlenmeler az karbonlu çeliklerde ve düşük alaşımlı çeliklerde ortaya çıkmaktadır. Alaşımlı çeliklerde ise alaşım oranına bağlı olarak değişmektedir. Alaşım elementleri oranı arttıkça dişlenme azalmaktadır. Borürlü tabakalar diş şekilli olmalarından dolayı ana metale daha iyi bağlanırlar. (Meriç ve diğerleri, 1999)

Tabakaların yapısal bileşimi borca zengin fazdan (FeB) ve demirce zengin fazdan (Fe₂B) oluşur. Mikro yapı fotoğraflarından iki farklı faz görülebilir. Koyu bölge FeB difüzyon tabakasını ve açık bölge ise Fe₂B difüzyon tabakasını gösterir. (Culha et al., 2008)

Genellikle, bor tabakasında testere dişi şeklinde tek bir Fe₂B fazının oluşumu istenir. FeB ve Fe₂B çift fazının oluşumu istenmez. Çünkü FeB fazı borca zengin olduğu için FeB fazı diğer demir bor fazlarından daha gevreklerdir (Çalık ve diğerleri., 2002). Ayrıca FeB ve Fe₂B fazlarının genleşme katsayılarının farklı olması da tek fazlı borür tabakasını önemli kılar. 200 ve 600 C sıcaklıklarda FeB fazının ısıl genleşme katsayısı $23 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ iken Fe₂B fazının aynı sıcaklık aralığında 7.85×10^{-6} 'dır. (Allaoui, 2006)

4.2.1. Tabaka Kalınlığı

Borlanan malzemenin cinsi, borlayıcı ortamın bileşimi, işlem şekli, sıcaklık ve süre borür tabakasının kalınlığına etki eden faktörlerdir. Teorik olarak tabaka kalınlığı sınırsızdır. Bu durum ancak işlem sıcaklığı ve süresinin artmasıyla mümkündür. İşlem sıcaklığının Fe-B denge diyagramında ötektik sıcaklığının (1149 °C) altında olması gerekir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda bölgesel erimeler meydana gelerek malzeme yüzeyini bozabilir. Zaman faktörü ise ekonomik açıdan belli bir değeri aşmayacaktır. (Baştürk ve diğerleri, 2006)

Tabaka kalınlığını sınırlayan bir diğer faktör de kırılđanlıktır. Tabaka kalınlığı artıkça kırılđanlıkta artacağı için özellikle çift fazlı tabakalarda kalınlığın fazla olmaması gerekmektedir.

Çeliklerde alaşım elementi ve karbon miktarının artması ile bor difüzyonu azalmaktadır. Bunun sonucu olarak borür tabakasının hem kalınlığını azaltmakta hemde diş şeklindeki yapısı düzleşmektedir. (Baştürk ve diğerleri., 2006)

Yüzey pürüzlülüğündeki değişim de oluşan borür tabakasının fazı ve fazların miktarının yanı sıra borür tabakasının kalınlığı ile ilgilidir. Fakat yüzey pürüzlülüğü ve tabaka kalınlığı arasında yaygın bir oran yoktur. (şahin, 2009)

Çelik esaslı malzemeler için kullanım şartlarına göre 20-200 µm tabaka kalınlığı uygundur. Kırılđanlık yönünden alaşımlı çeliklerde 100 µm, alaşımsız çeliklerde 200 µm kalınlığa hatta darbesiz aşınmaya maruz parçalarda su vermemek kaydıyla 400 µm kalınlığına çıkabilmektedir. (Baştürk ve diğerleri, 2006)

4.2.2. Sertlik

Demirli malzemelerin borlanması, malzeme yüzeyinde FeB ve Fe₂B ile bu bileşiklerin karışımından oluşan tek veya çift fazlı borür tabakaları elde edilir. Alaşımlı çeliklerde ve diğer malzemelerde kendi alaşım elementlerinin borürleri oluşur (şahin,1999). Tablo 4.2.2.1 'de çeşitli malzemelerde borlama ile elde edilen borürler ve mikro sertlik değerleri verilmiştir. Borür tabakasının mikro sertliği büyük oranda borür tabakasının yapı ve bileşimine ve esas malzemenin bileşimine bağlıdır. (ASM Handbook Komitesi, 1991)

Karbonlu çeliklerde oluşturulan borür tabakasının sertliği diğer geleneksel yüzey sertleştirme işlemleriyle elde edilen sertliklerden daha yüksektir. Sertleştirilmiş takım çeliği ve sert krom elektroliz ile kaplama sertliklerini aşmaktadır ve tungsten karbürün sertliği ile eşittir. (ASM Handbook Komitesi, 1991)

Sertlik bakımından borlu tabakanın en önemli bir başka özelliği de daha sonraki ısıl işlemlerde bu sertliğini korumasıdır. Borlu tabakanın 900 °C 'a kadar sertliğini koruması, matris malzemesine yapılacak ısıl işlem için geniş bir sıcaklık aralığına izin verir. (Baştürk ve diğerleri, 2006)

Tablo 4.2.2. 1. Çeşitli metallerde elde edilen borür fazları ve mikro sertlikleri (ASM Handbook Komitesi, 1991)

Malzeme	Borür tabakasındaki fazlar	Tabakanın mikrosertliği, HV veya kg/mm ²	Erime Noktası	
			°C	°F
Fe	FeB	1900-2100	1390	2535
	Fe ₂ B	1800-2000	...	...
Co	CoB	1850	...	...
	Co ₂ B	1500-1600	...	...
	Co ₃ B	700-800	...	...
Co-27.5 Cr	CoB	2200 (100 g) ^(a)	...	...
	Co ₂ B	~1550 (100 g) ^(a)	...	...
	Co ₃ B (?)	700-800	...	...
Ni	Ni ₄ B ₃	1600	...	...
	Ni ₂ B	1500	...	...
	Ni ₃ B	900	...	...
Inco 100	...	1700 (200 g) ^(b)	...	...
Mo	Mo ₂ B	1660	2000	3630
	MoB ₂	2330	~2100	~3810
	Mo ₂ B ₅	2400-2700	2100	3810
W	W ₂ B ₅	2600	2300	4170
Ti	TiB	2500	~1900	3450
	TiB ₂	3370	2980	5395
Ti-6Al-4V	TiB		...	...
	TiB ₂	3000 (100 g) ^(a)	...	...
Nb	NbB ₂	2200	3050	5520
	NbB ₄		...	...
Ta	Ta ₂ B		3200-3500	5790-6330
	TaB ₂	2500	3200	5790
Hf	HfB ₂	2900	3250	5880
Zr	ZrB ₂	2250	3040	5500

4.2.3. Aşınma

Borür tabakasının aşınma direnci, tabakanın tek veya çift fazlı olduğuna ve oluşum biçimine bağlıdır. En az aşınma Fe₂B en fazla aşınma ise daha sert FeB fazında olan tabakada meydana gelmektedir. Çünkü FeB fazı Fe₂B fazından daha gevrek yapıdadır. (Buytoz, 2005)

Borlanmış çelikler yüksek sertliklerinden dolayı abrasif aşınmaya karşı çok iyi direnç gösterirler. Bu nitrülünen ya da karbürlenen çeliklere kıyaslandığında mükemmel derecede fazladır. (Karakan, 2002).

Darbeli yüklemeye maruz kalıp yüzeylerinin borlanmasıyla ulaşılan ömür artışları, borür tabakasının sertliğinden ziyade belirtilen dişdibi formasyonunun varlığı ile ilişkilendirilebilir.

Darbeli ve adhesif aşınmaya götüren yüklemelerde, borlama tabakası kalınlığı mümkün olduğunca ince tutulmalıdır. (Demirci, 2004)

4.2.4. Korozyon

Bor, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon olabilen malzemeleri korumanın yanı sıra çeliklerin imalatında bir yağlayıcı ve korozyon engelleyici olarak kullanılmaktadır (Campos, 2006)

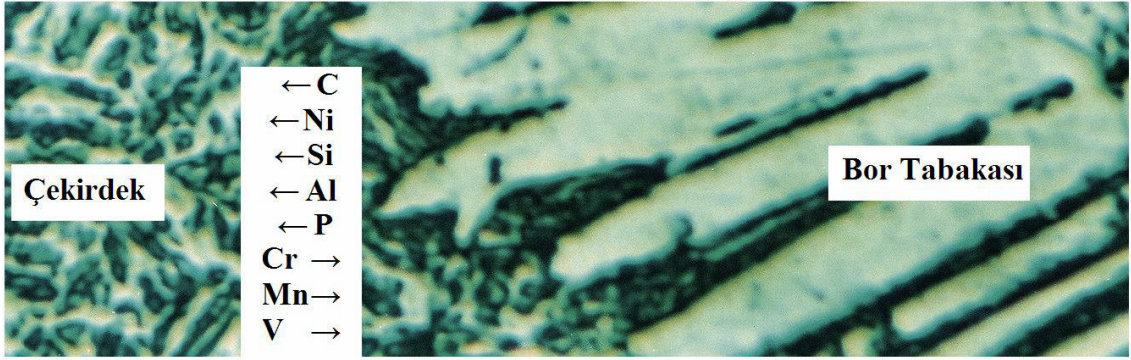
Bununla beraber borlama işlemi borür tabakasıyla kaplanan metal ve metal olmayan yüzeylerin korozyon ve aşınma direncini sağlar. Borürle kaplanmış çeliklerin korozyon direnci büyük oranda kaplamadaki gözeneklerin ve mikro çatlakların oranına bağlıdır. Gözenekli ya da çatlaklı kaplama korozyon direnci zayıf olan esas malzemeye korozyon ortamının girişine izin verir (Campos, 2007)

Borür tabakası alkalik çözeltilere karşı dayanım sağlarken özellikle oksitleyici asitlere karşı koruyuculuk göstermez. (Demirci, 2004)

4.2.5. Alaşım Elementlerinin Etkisi

Alaşım elementlerinin borlama sırasındaki hareket yönü Şekil 4.2.5.1 'de gösterilmektedir.

Demir alaşımlardaki C, Cr ve Ni gibi bazı elementlerin oranı borür tabakasında büyük etkiye sahiptir. C oranının artmasıyla tabaka kalınlığı azalır ve sertliği de artmaktadır (%0,5 C oranında daha fazla ise). FeB ve Fe₂B fazlarında C önemli ölçüde çözünmediği için borür tabakasının dışına doğru sürülen C malzeme ile Fe₂B tabakası arasında karbürler ve borkarbürlerce (Fe₃C, Cr₂₃C₆, Fe₇C₆, Fe₃(B,C)) zengin bir çok fazlı bölge oluşturur. Aynı zamanda bu yüksek karbonlu çeliklerde borür tabakasının çok gevrek ve esas metale zayıf bağlı olmasını açıklamaktadır. Cr 'un bir etkisi borür tabakasındaki FeB fazının miktarını arttırmaktır. Nikelin varlığında ise oranının artmasıyla bileşik tabakası daha düzenli ve ince olur. (Béjar, 2006)



Şekil 4.2.5. 1. Alaşım Elementlerinin Borlama Sırasındaki Hareket Yönü (Uluköy, 2005)

Silisyum ve alüminyum da karbon gibi davranarak, bor tabakası içerisinde çözünmezler. Bor atomları tarafından yüzeyden içeriye doğru itilirler. Yüksek miktarda Si ve Al içeren çelikler borlamaya uygun değildirler. Çünkü bor tabakasının altında yumuşak bir ferrit zonu oluştururlar. Bu da pullanma dayanımını azaltır. (Uluköy, 2005)

4.2.6. Kırılma Tokluğu

Borür tabakasının kırılma tokluğu, işlem sıcaklığına, süresine ve uygulanan akım yoğunluğuna bağlıdır. Borlanan çeliğin içerdiği alaşım elementleri, borür tabakası oluşum hızını ve tabaka kalınlığını etkilemesiyle kırılma tokluğunu da etkiler. (Ersöz, 2008)

Tasarımda önemli bir mekaniksel özellik de kırılma tokluğu değeridir. Borür tabakasının kırılma tokluğu ile ilgili çalışmalar yapılmış ve bulunan değerler geniş bir aralıkta 1.39 ve 6.40 MPa m^{1/2} arasında değişmektedir. (Campos, 2008).

5. VICKERS İNDENTASYON TESTİ

Seramik ve intermetalik bileşikler gibi gevrek malzemeler için kırılma tokluğu K_{ic} olarak tanımlanmıştır. K_{ic} hesaplamak için Vickers izleri günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Arios et al, 2009). Vickers sertlik izleriyle kırılma tokluğu belirleme Evans ve Charles (1976) tarafından geliştirildi ve sonra Niihara (1982), Anstis (1981) ve Lawn (1980) tarafından tekrar düzenlendi. Bu test yöntemi ile kırılma tokluğu Vickers uç ile iz oluşturma sırasında gelişen çatlakın uzunluğundan hesaplanır ve numune yüzeyinden optik bir şekilde ölçülebilir (Munz, 1999)

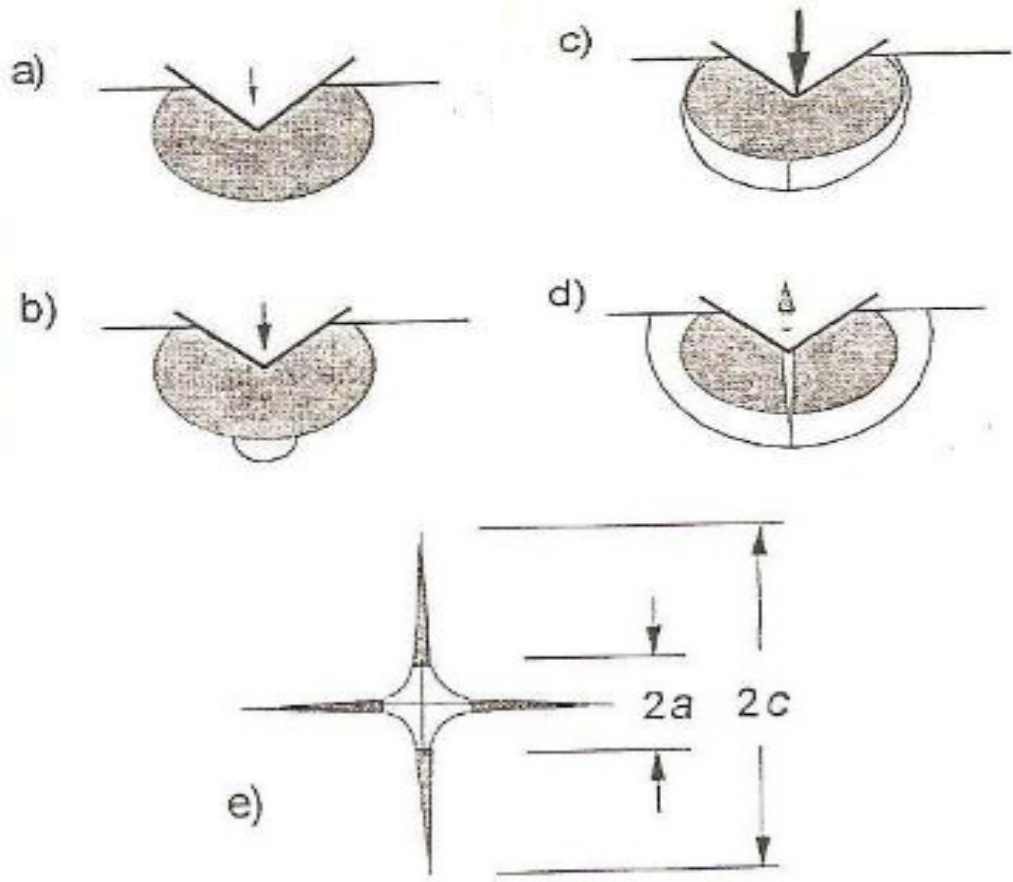
Kırılma tokluğu belirlenecek test numunelerinin yüzeyleri yüksek bir kalitede parlatılarak hazırlanmalıdır. Parlatılan numune yüzeyine bir Vickers piramit mikro sertlik ucu batırılır. Geleneksel sertlik test cihazı üst bir sınıra kadar uca yük uygular sonra belirlenen bir periyot boyunca yük kalır ve ucundaki yük kaldırılır.

Yüksek bir yükleme ile numune yüzeyinde Vickers kare izin köşelerinden 4 çatlak oluşur. Çatlakın uzunluğu, yük, iz boyutları, sertlik ve malzemenin elastik modülü ve bir deneysel kalibrasyon sabiti malzemenin kırılma tokluğunu hesaplamak için kullanılır (5.1)(Munz, 1999).

$$K_{ic} = \phi \sqrt{a} H \left(\frac{Y}{H} \right)^{0.4} f \left(\frac{c}{a} \right) \quad (5.1)$$

Parametrelerin durumu batma sonucu oluşan çatlakın tipine bağlıdır.

Vickers iz çatlaklarının gelişimi Şekil 5.1 ' de gösterilmiştir. Vickers piramidin altında deformasyon bölgesi oluşur (Şekil 5.1.a). Yükleme yapılırken ve kaldırılırken deformasyon bölgesinin en derin yerinde çatlak oluşumu başlar (Şekil 5.1.b). Çatlak örnek yüzeyine ilerler (Şekil 5.1.c). Çatlakın son hali neredeyse yarım dairedir (Şekil 5.1.d). Yüzeydeki çatlak uzunluğu 2c, izin köşegen uzunluğu 2a'dır (Şekil 5.1.e).(Munz, 1999)

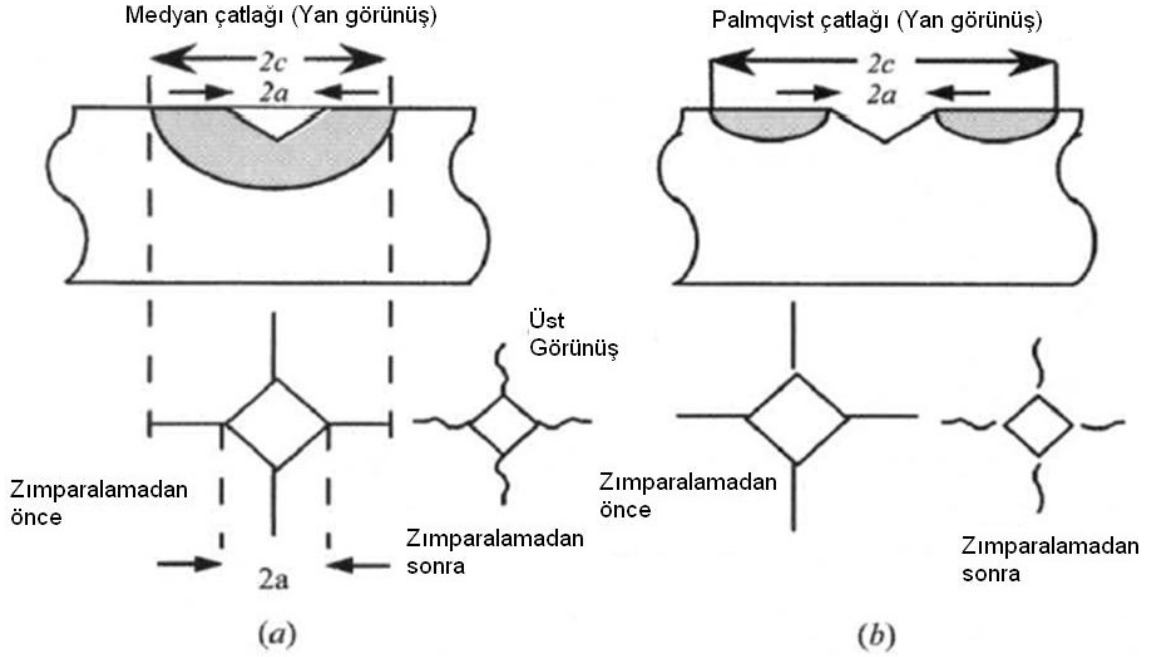


Şekil 5.1. Vickers iz çatlaklarının gelişimi (Munz, 1999)

Seramiklerde kırılma tokluğunun belirlenmesinde radyal medyan ve Palmqvist çatlak tipleri kullanılmaktadır. Düşük yüklemelerde Palmqvist çatlakları görünürken, yüksek yüklemelerde medyan çatlakları oluşur. Bu çatlak tipleri klasik lineer elastik kırılma mekaniği teorisini temele alır. (Campos et al, 2008)

İzin altındaki plastik olarak zarar görmüş bölgeyle ilgili pek çok varsayım yapılmaktadır. Zarar gören bölge katıdaki genişleyen bir oyuk olarak modellenir. Genişleyen oyuktaki gerilim dağılımı medyan veya Palmqvist çatlaklarını aşan eş değer bir kuvvete sırasıyla dönüştürülür. (Campos et al, 2008) Palmqvist veya radyal çatlakların oluşumu malzemenin yanı sıra uygulanan yüke de bağlıdır ve bu sebeple uygulanan yüke bağlı olarak birinden diğerine dönüşüm gerçekleşebilir. (Rios et al, 2009).

Bu iki tip çatlak arasındaki farkı bulmanın bir yolu yüzey tabakasını zımparalamaktır. Palmqvist çatlağı (Şekil 5.2.b) izin tersine çevrildiğinde piramitten ayrı kalırken, medyan çatlağı Şekil (5.2.a) bağlı kalacaktır (Barsoum, 1996)



Şekil 5.2 . Medyan ve Palmqvist çatlağı (Barsoum, 1996)

Batma süresince oluşan çatlak sistemlerine bağlı farklı formüller geliştirilmiştir. Yüzeyde köşe çatlakları görüldüğü zaman ya radyal ya da Palmqvist çatlakları olabilir. Genellikle $c/a > 2,5$ ise radyal medyan, $c/a < 2,5$ ise Palmqvist çatlağıdır. Birinci durum için kırılma tokluğu şöyle ifade edilir: (Keryvin et al, 2009)

$$K_C = \alpha \left(\frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P}{c^{3/2}} \quad \frac{c}{a} \geq 2,5 \quad (5.2)$$

α = Uç geometrisine bağlı katsayı

P = Çatlak oluşumunda uygulanan yük (N)

E = Elastisite modülü (GPa)

H = Sertlik değeri (GPa)

$$c = a + l \quad (5.3)$$

a = İzin köşegen uzunluğunun yarısı (m)

l = Çatlak uzunluğu (m)

İkinci durum için:

$$K_c = k_2 \frac{Hv\sqrt{a}}{\phi} \left(\frac{E\phi}{H_v} \right)^{2/5} \left(\frac{l}{a} \right)^{-1/2} \quad \frac{c}{a} < 2,5 \quad (5.4)$$

Hv = Vickers Sertlik Değeri (GPa)

k_2 = sabit

ϕ = Meyer Sertliği yerine Vickers Sertliği kullanırken kısıtlayıcı faktör (Keryvin et al, 2009)

Palmqvist çatlak tipleri için, a yarım köşegen uzunluğu ile l izin köşegenlerinde oluşturulmuş çatlak uzunluğu arasındaki ilişkinin $l/a \leq 3$ olması gerektiği belirlenmiştir. Malzemenin daha gevrek olduğu yerdeki çatlak başlangıcını temele alan Palmqvist çatlak yapısını dayanıklı malzemedeki ince gevrek tabakalara kullanmak daha uygun olacaktır.

Vickers indentasyon tekniği sadece düz ve parlatılmış bir yüzey gereken zarar vermeyen kolay bir tekniktir. Malzeme ile batıcı arasındaki mekanik ilişki ile çatlaklar üretilir (Campos e al, 2008). Bu teknik ile ölçülen Kıc değerleri, diğer makroskopik test ile elde edilenler kadar hassas değildir (Barsoum, 1996). Ayrıca çatlak tipi Palmqvist iken radyal medyan tip çatlağa dönüşebilir. Batma işleminden sonra çatlak boyutları hemen ölçülmelidir.

6.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Malzeme Seçimi

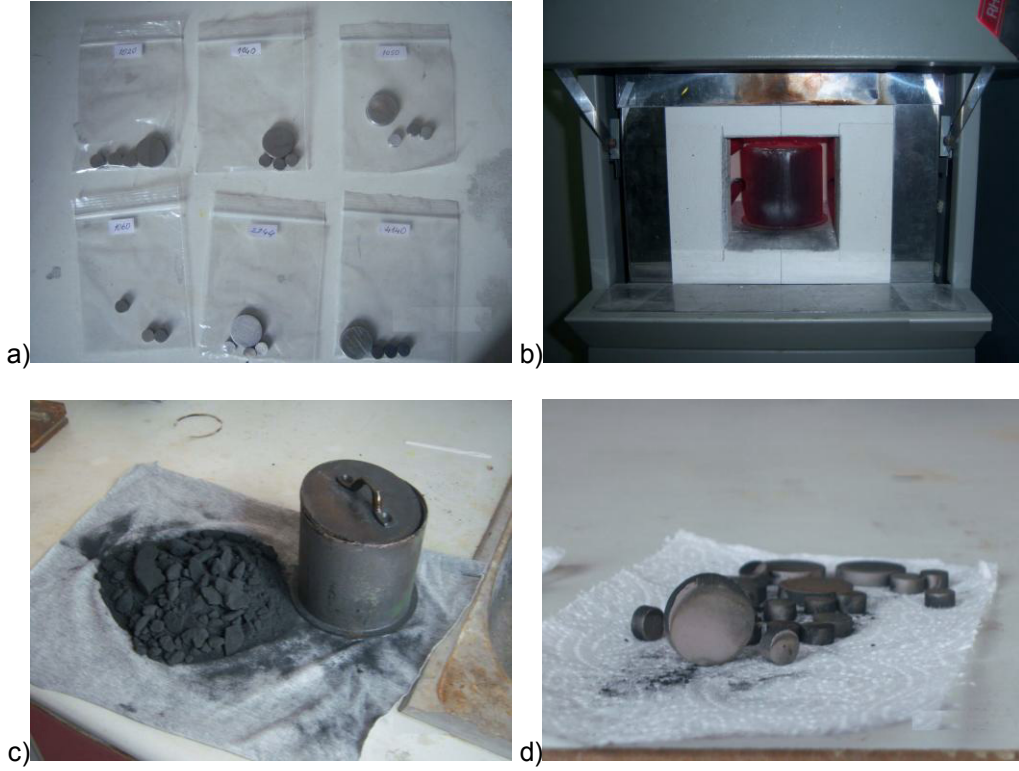
Bu çalışmada, AISI 1020, AISI 1040, AISI 4140, AISI H13 çelikleri farklı süre ve sıcaklıklarda borlanarak korozyon ve kırılma davranışları incelenmiştir. Tablo 6.1.1 'de deneylerde kullanılan çeliklerin spektral analiz sonuçları görülmektedir.

Tablo 6.1. 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimi (% ağırlık)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Ti	Nb	V	W	Fe
1020	0,18	0,22	0,57	0,02	0,01	0,09	0,09	0,01	0,01	0,28	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	98,5
1040	0,44	0,22	0,74	0,01	0,02	0,08	0,13	0,01	<<0,01	0,3	<0,01	<<0,01	<0,01	0,01	98,0
4140	0,41	0,22	0,92	0,02	0,08	0,89	0,16	0,26	0,01	0,16	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	96,8
H13	0,47	1,12	0,34	0,02	<0,01	>3,5	0,09	1,39	<0,01	0,08	<0,01	0,01	0,99	0,13	91,7

6.2. Borlama

10 mm çapında ve 5 mm yüksekliğinde hazırlanan silindirik parçaların yüzeyleri temizlenerek borlama işlemi için uygun hale getirildi. Borlama işlemleri 820, 860, 900 ve 940 °C sıcaklıklarda 2,4,6 ve 8 saat sürelerde yapılmıştır. Borlama işlemlerinde bor kaynağı olarak EKabor 2 (Bortec, Almanya) kullanılmıştır. Borlama işlemleri paslanmaz çelikten hazırlanmış kutularda, Carbolite RHF1600 (İngiltere) fırın kullanılarak yapılmıştır. Borlama işlemleri esnasında çekilen fotoğraflar Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 6.2. 1. a) Numuneler borlanmadan önce, b) Borlama sırasında, c) Borlama kutusu ve borlama ortamı, d) Borlanmış numuneler

6.3. Metalografik Analiz

Borlanmış numuneler Şekil 6.3.1' de görüldüğü gibi soğuk kalıplanarak yeterli kesite ulaşana kadar SiC zımparalarda aşındırılmış ve 1 μm boyutundaki elmas parçacıkları ile ayna parlaklığına getirilmiştir. Parlatma işlemlerinden sonra %2 lik nital ile dağlanarak içyapı fotoğrafları elde edilmiştir. Fotoğraflar üzerinden borür tabakası kalınlıklarının ölçümünde Moticom görüntü işleme yazılımı kullanılmıştır. 3 içyapı fotoğrafından ölçülen tabaka kalınlıklarının ortalamaları hesaplanarak ortalama tabaka kalınlığı elde edilmiştir.



Şekil 6.3.1 . Borlanmış numunelerin soğuk kalıplama işleminden sonra aşındırılmış görüntüleri

6.4. Mikro Sertlik

Parlatılmış numunelerin sertliği, Future-Tech marka mikro sertlik cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler, 50 gram yük 10 saniye süresince etki ettirilerek gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri yüzeyden malzemeye doğru bir çizgi üzerinden takip edilerek elde edilmiştir. Sadece 8 saat süreyle borlanan numunelerin sertlikleri incelenmiştir.

6.5. Korozyon Deneyi

Korozyon deneyi, H₂SO₄ (%10) çözeltisi ve yapay deniz suyunda daldırma yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan sıvıların bileşimi Tablo 2 'de verilmiştir. Deneyde 860°C ve 900 °C sıcaklığında 2 ve 4 saat sürelerde borlanan AISI 1040, AISI 4140 ve AISI H13 çelikleri kullanılmıştır. Borlama işleminden sonra oda sıcaklığında 3 dakika süre ile ultrasonik temizleme yapılan numuneler korozyon sıvıları içerisine yerleştirilmiş ve 21 gün boyunca izlenerek ağırlıkları 0,0001 gr hassasiyetli terazi ile ölçülmüştür. Asitle yapılan deneyde ilk ölçümler 6 saat boyunca birer saat aralıklarla alınmıştır. Daha sonra aralıklar uzatılarak her iki sıvı için 1, 2, 3, 4, 7, 14, ve 21. günlerin sonunda ağırlıkları tartılmıştır.

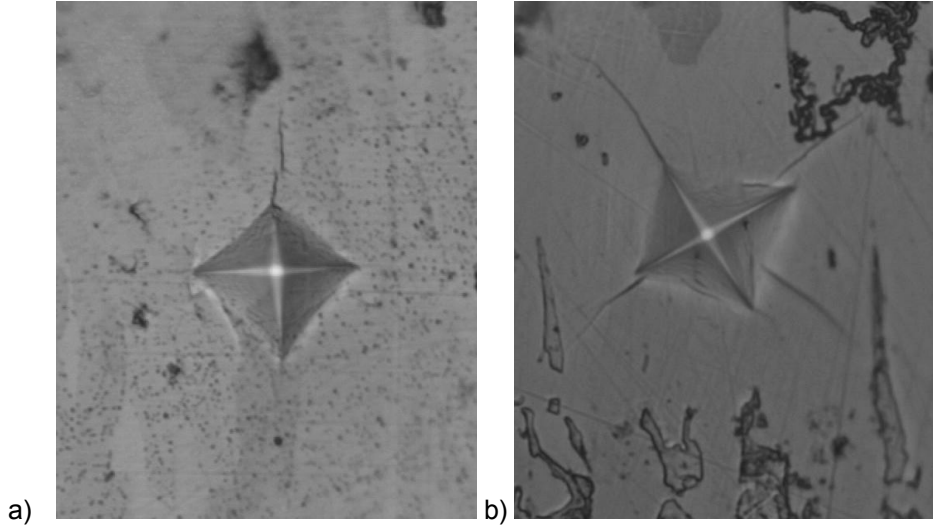
Her kütle ölçümünden önce 3 dakika ultrasonik temizleme uygulanmış ve her aşamada korozyon sıvısı tazelenmiştir. Kullanılan korozyon sıvıları Tablo 6.5.1. 'de verilmiştir. Ayrıca korozyon meydana gelen yüzeyler, Nikon SMZ800 stereo mikroskop ile fotoğraflanmıştır.

Tablo 6.5. 1. Korozyon deneyinde kullanılan asit çözeltisinin bileşimi

Sıvı	Bileşim	
Yapay Deniz Suyu	96,5 gr su	3,5 gr NaCl
Asit Çözeltisi (%10)	90 ml su	10 ml H ₂ SO ₄

6.6. Kırılma Tokluğu Ölçümü

FeB ve Fe₂B borür tabakalarının kırılma tokluklarını belirlemek için Vickers Sertlik cihazıyla Şekil 6.6.1 'deki gibi çatlaklar oluşturulmuştur. Sertlik izi etrafında çatlak oluşumunu sağlayacak en az yük saptanarak her parametre için uygun yük belirlendi. Genellikle FeB tabakası için 100 g yük, Fe₂B tabakası için 300 g yük uygulanmıştır. Oluşturulan çatlak uzunlukları ve izin yarım köşegen boyları Nikon Ecilipse LV100 optik mikroskobu ile incelenerek ölçülmüştür. Kırılma tokluğu hesabında gerekli olan sertlik değeri için ölçülen Vickers sertlikleri kullanılmıştır.



Şekil 6.6.1 . a) FeB tabakasında b) Fe₂B tabakasında 2,94 N yükü oluşturulmuş iz ve çatlak görüntüsü.

Oluşturulan çatlaklar hem medyan hem de Palmqvist çatlak tipi olarak değerlendirilerek kırılma toklukları elde edilmiştir. Borür tabakasının elastisite modülü literatürde 290 GPa 'dır. Kırılma tokluğu hesabı denklem (6.6.1) ve (6.6.2) kullanılarak yapılmıştır. Palmqvist tip çatlaklardan hesaplanan kırılma tokluğunda için gerekli ϕ değeri 3 olarak alınmıştır. (Campos et al, 2008).

$$K_c = 0,028 \left(\frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P}{c^{3/2}} \quad \frac{c}{a} \geq 2,5 \quad (6.6.1)$$

$$K_c = 0,085 \frac{H_v \sqrt{a}}{\phi} \left(\frac{E\phi}{H_v} \right)^{2/5} \left(\frac{l}{a} \right)^{-1/2} \quad \frac{c}{a} < 2,5 \quad (6.6.2)$$

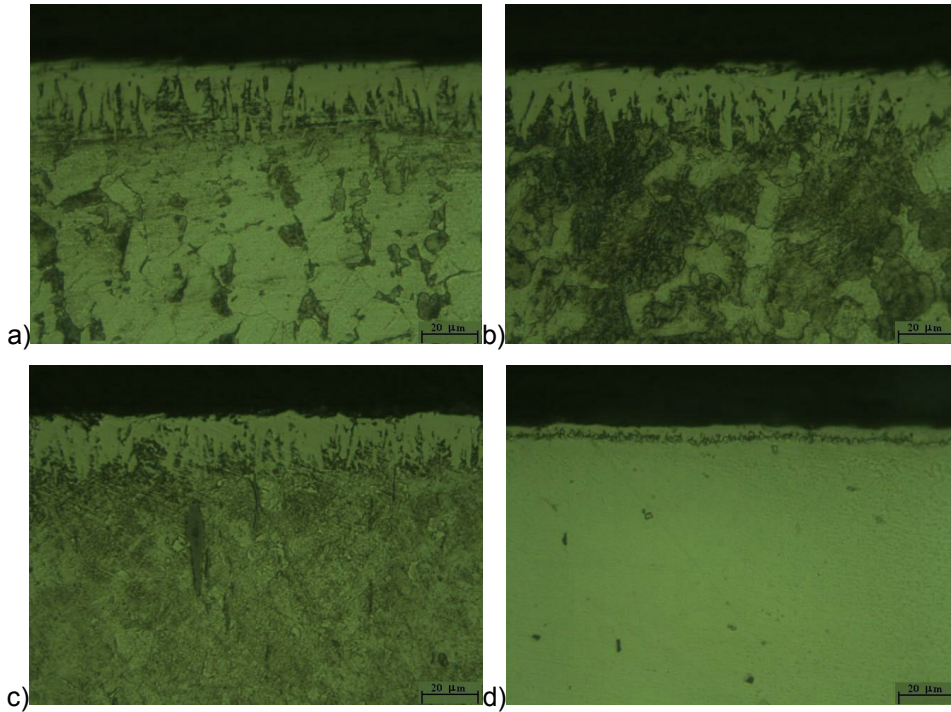
7. DENEY SONUÇLARI

7.1. Mikro yapı

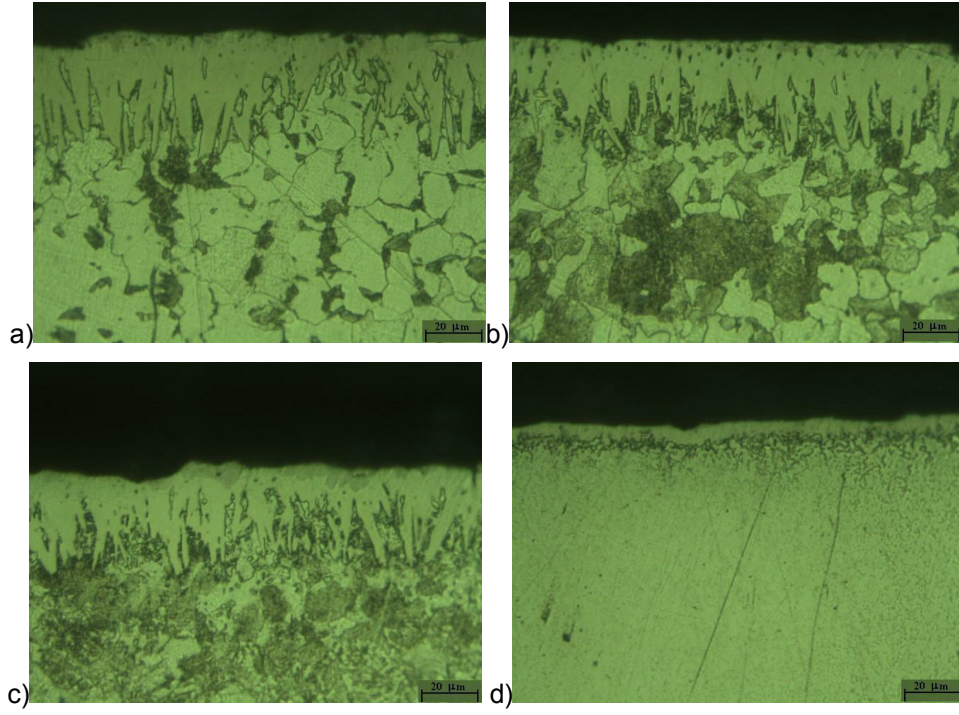
Metalografik inceleme sonrasında borlama sonucunda oluşan borür tabakalarının fotoğrafları Şekil 7.1.1 – 7.1.16 'da verilmiştir. Resimlerde Fe_2B tabakası açık renkte FeB tabakası ise koyu renkte görülmektedir. Borlama sıcaklığına ve süreye bağlı olarak bazı çeliklerde FeB tabakası oluşmamıştır.

Aynı süre ve sıcaklıkta borlanan çeliklerde tabaka gelişimi en az olan çelik AISI H13 çeliğidir. Yüksek alaşıma sahip olan AISI H13 çeliğinde, düşük borlama sıcaklıkları ve sürelerinde FeB tabakası meydana gelmemiştir. İçerisindeki alaşım elementleri bor difüzyonu zorlaştırarak hem tabaka kalınlığının artmasını hem de ikinci faz oluşumunu engellemiştir.

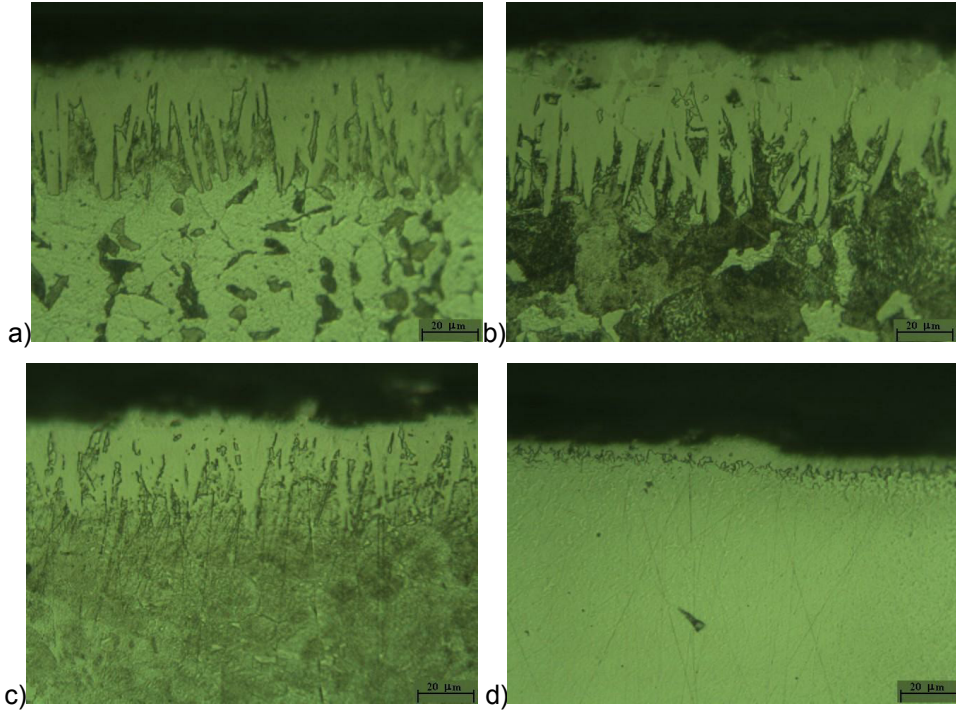
Ayrıca Fe_2B tabakası ile ikinci faz olan FeB arasında çatlama ve FeB fazının kısmi kopmalar meydana gelmiştir (Şekil 7.1.7, 7.1.8, 7.1.11, 7.1.14). Bu yapılar daha çok kolonsallığın düşük olduğu H13 çeliğinde görülmektedir. Her iki fazın termal genleşme katsayılarının farklı olması çatlama ve kopmalara neden olmaktadır. Bu olumsuz durum az gelişmiş ve kolonsallığı düşük olan borür tabakalarında daha yoğun olarak görülmektedir.



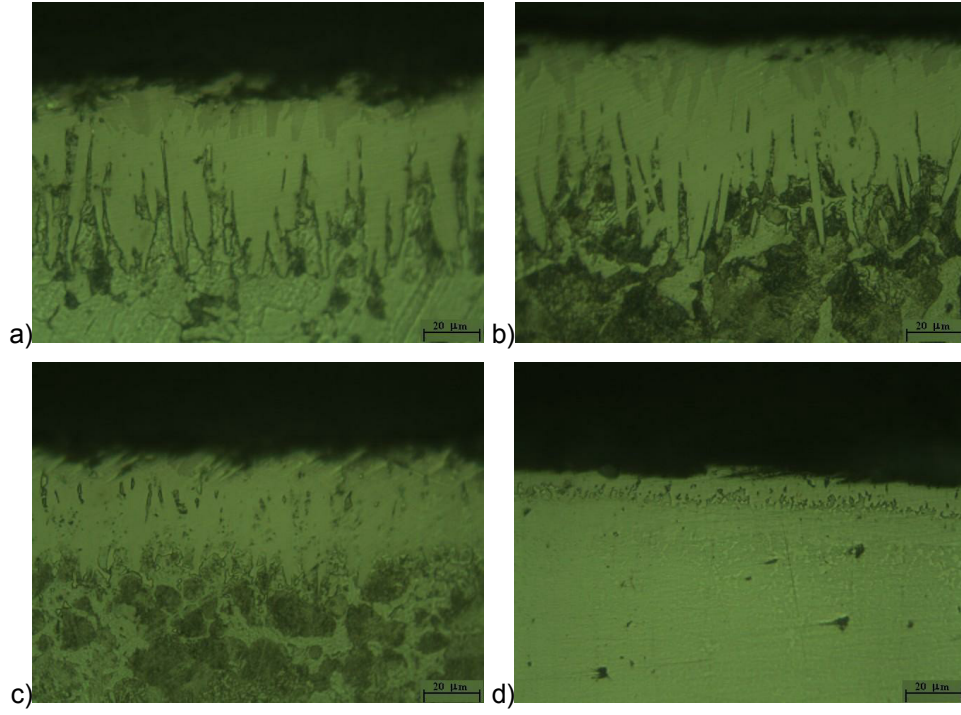
Şekil 7.1.1 . 820°C' de 2 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.



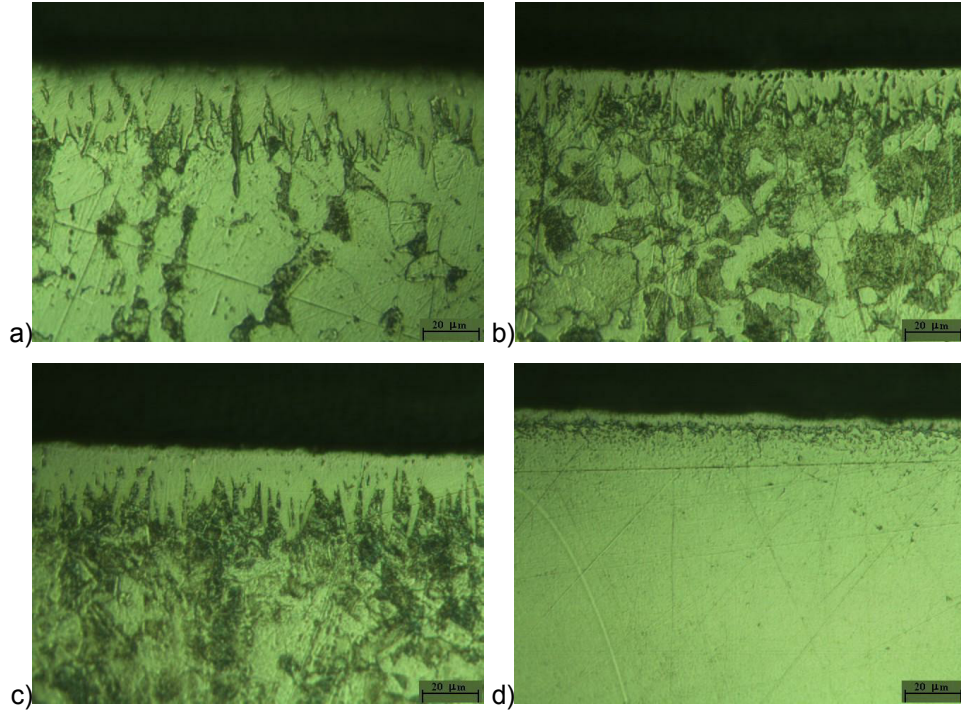
Şekil 7.1.2 . 820°C' de 4 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait içyapı fotoğrafları



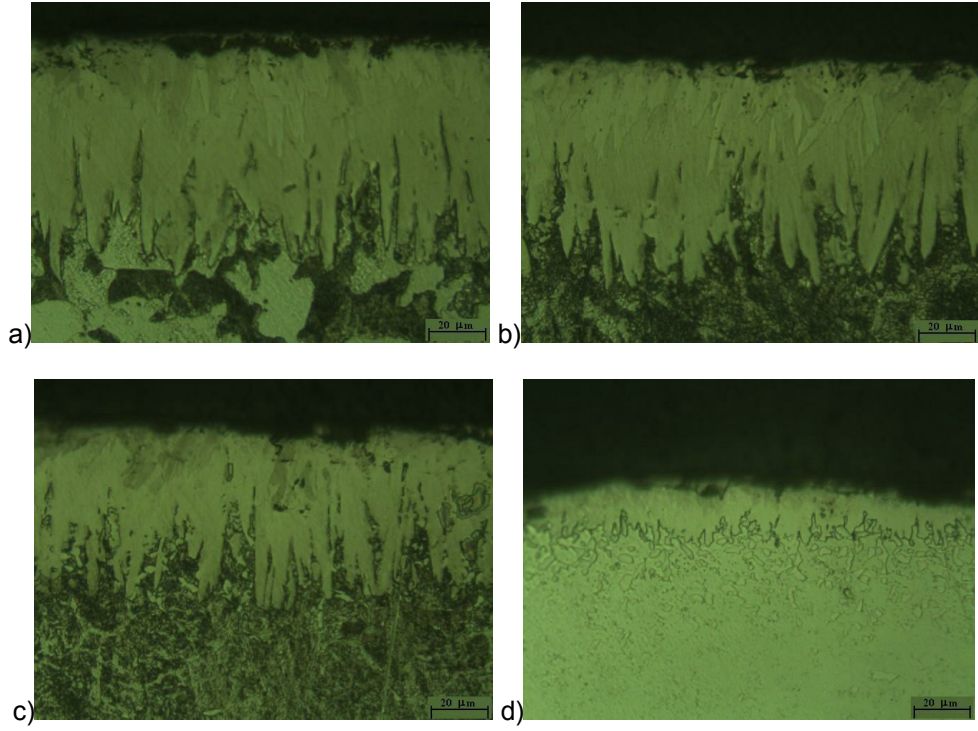
Şekil 7.1. 3 . 820°C' de 6 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve AISI 2344 çelikleri ait iç yapı fotoğrafları.



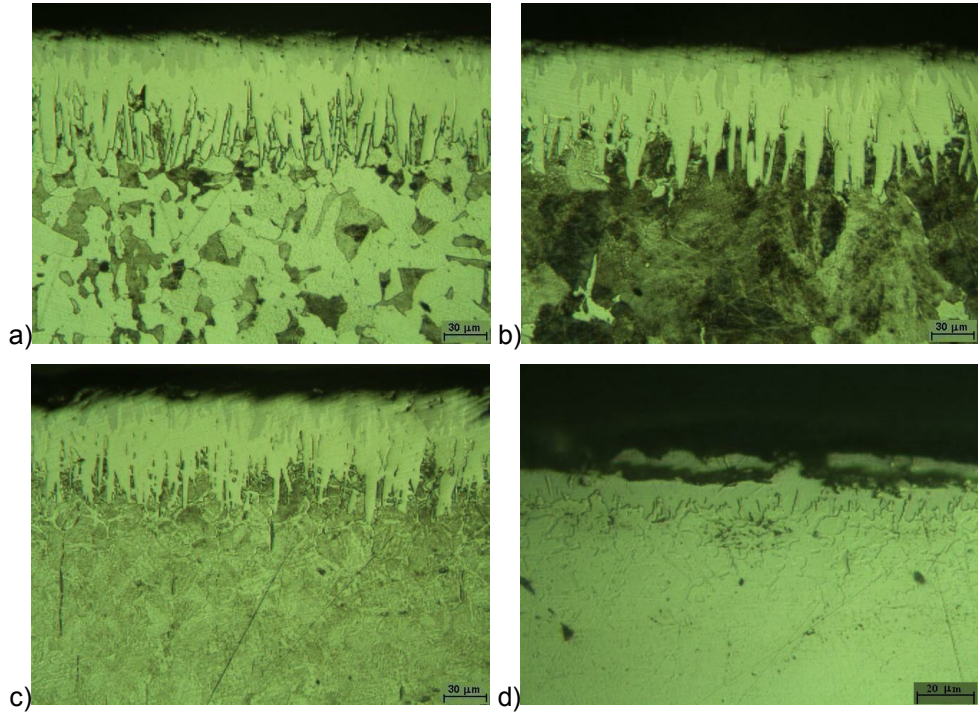
Şekil 7.1. 4 . 820°C' de 8 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI 2344 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.



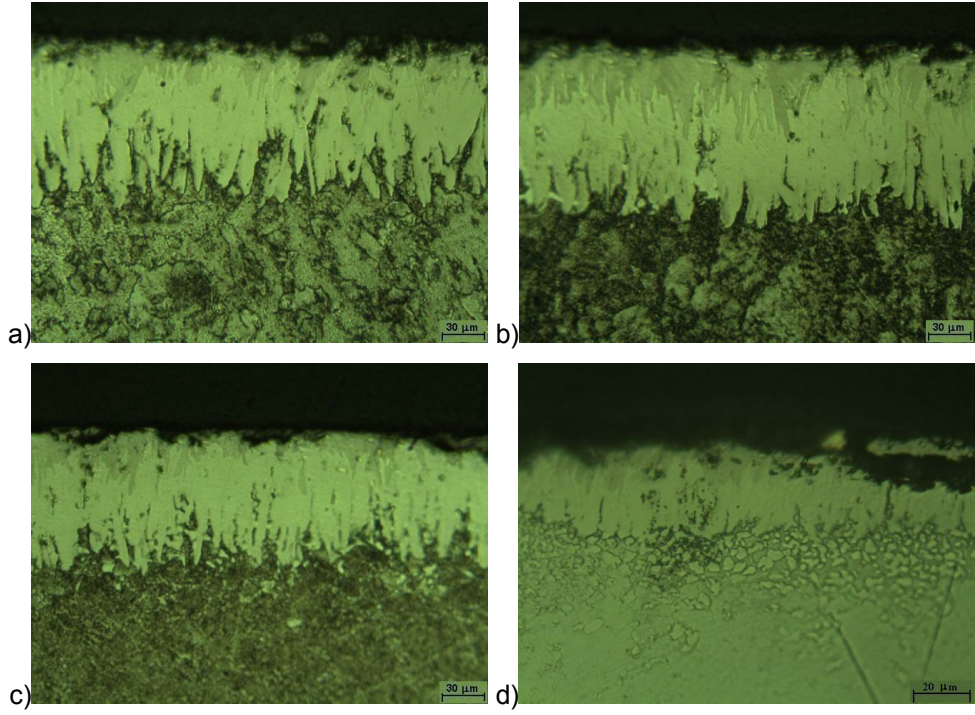
Şekil 7.1. 5 . 860°C' de 2 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.



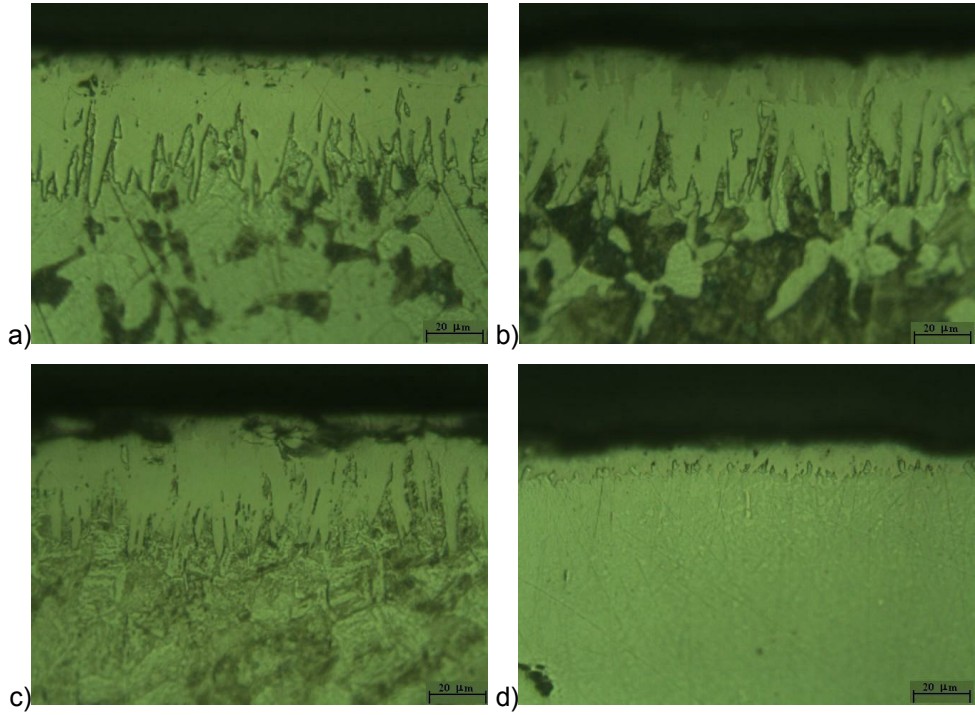
Şekil 7.1.6 . 860°C' de 4 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 2344 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.



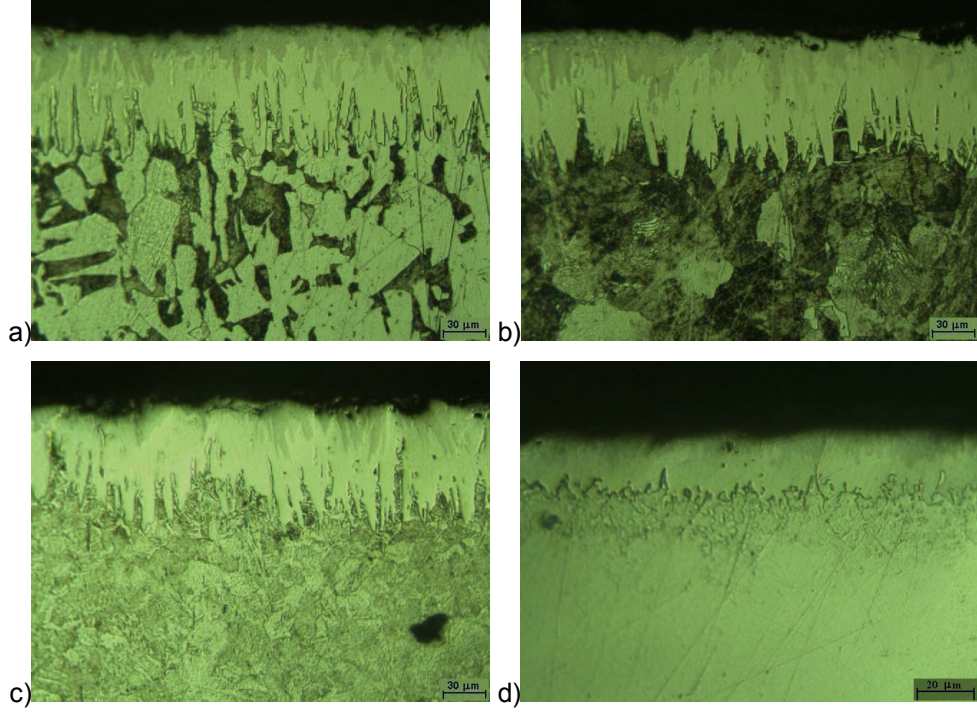
Şekil 7.1.7 . 860°C' de 6 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.



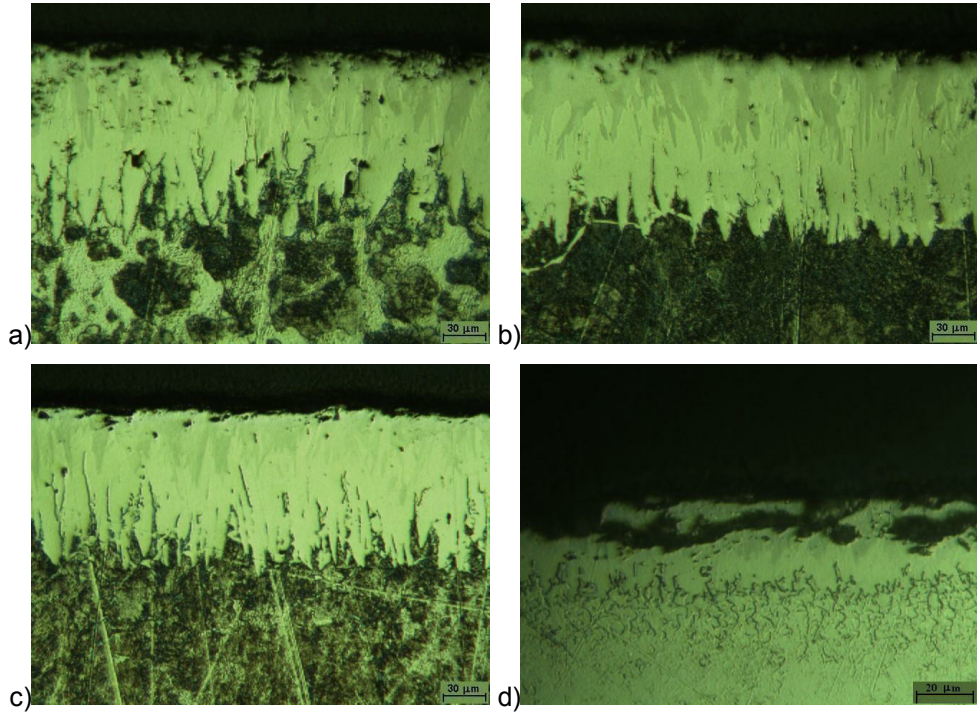
Şekil 7.1.8 . 860°C' de 8 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.



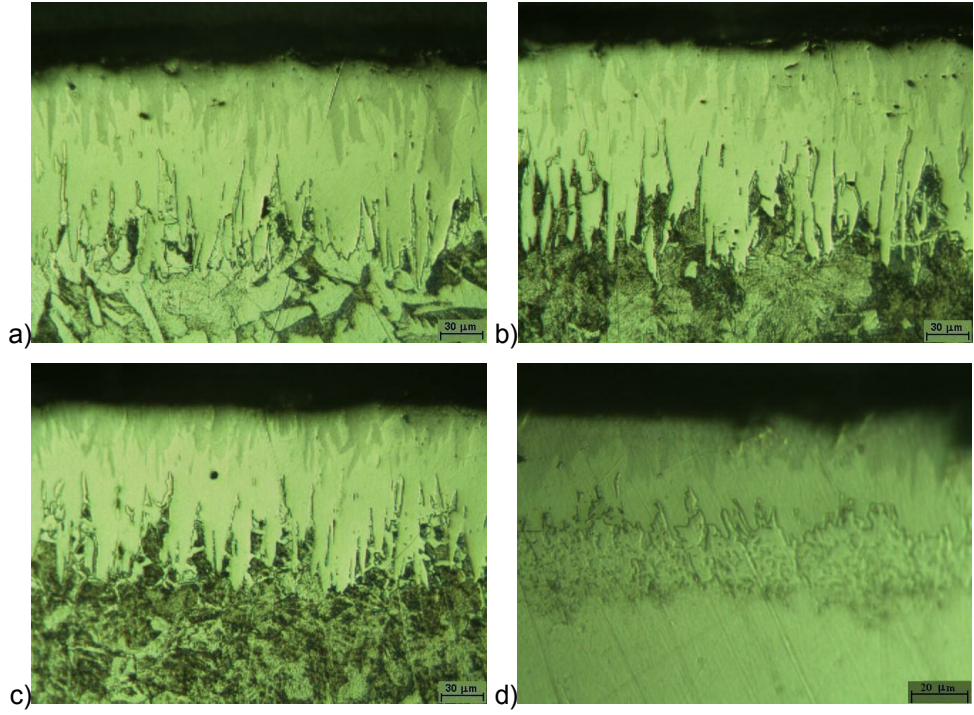
Şekil 7.1.9 . 900°C' de 2 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.



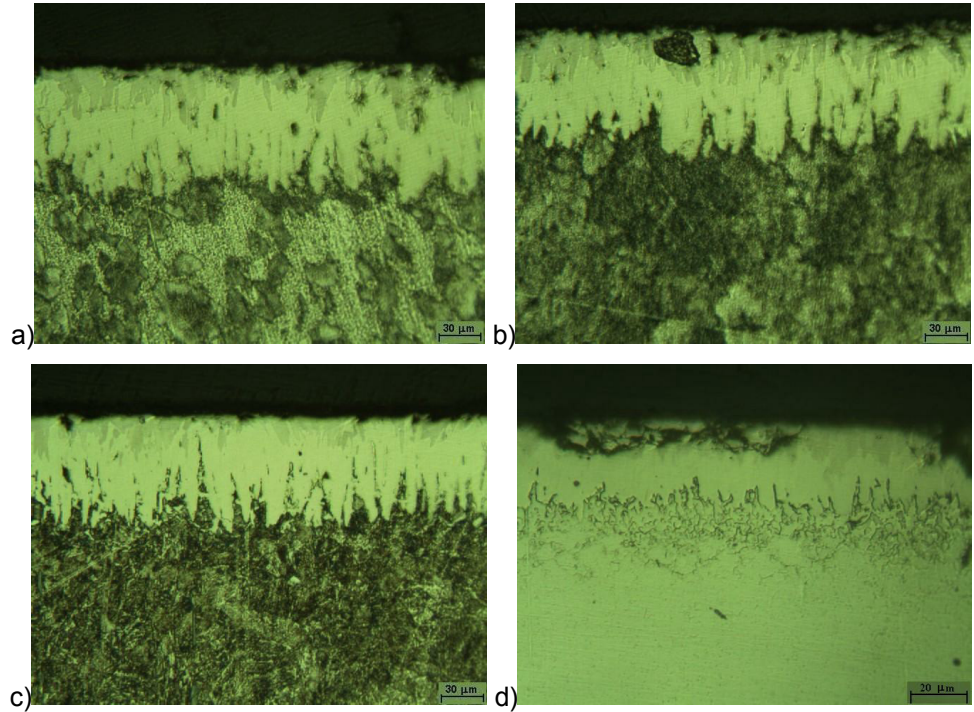
Şekil 7.1.10. 900°C' de 4 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.



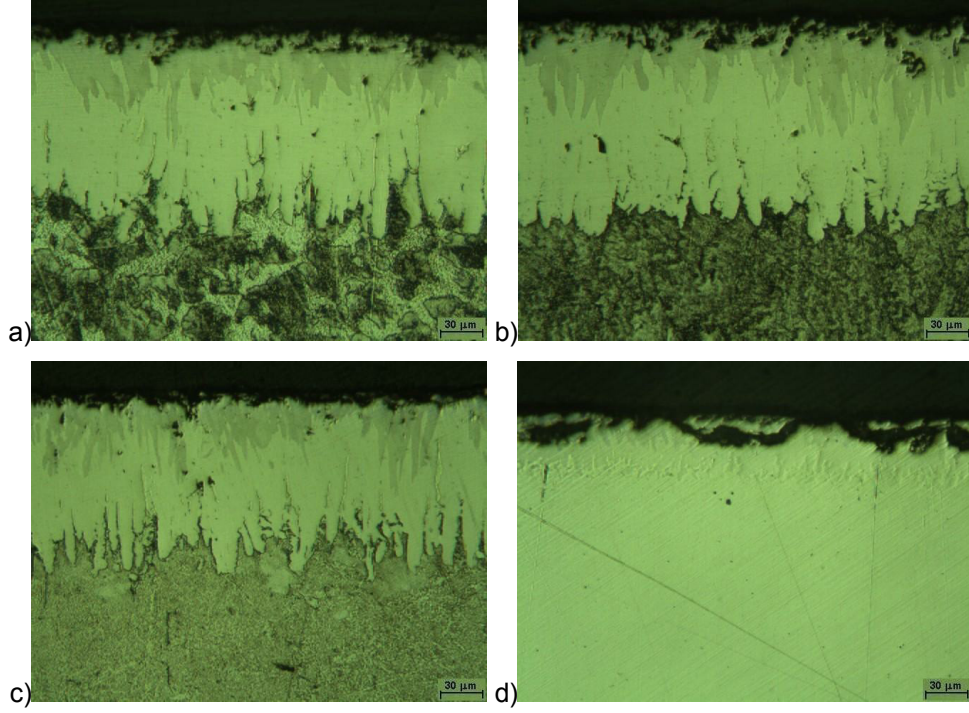
Şekil 7.1.11. 900°C' de 6 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.



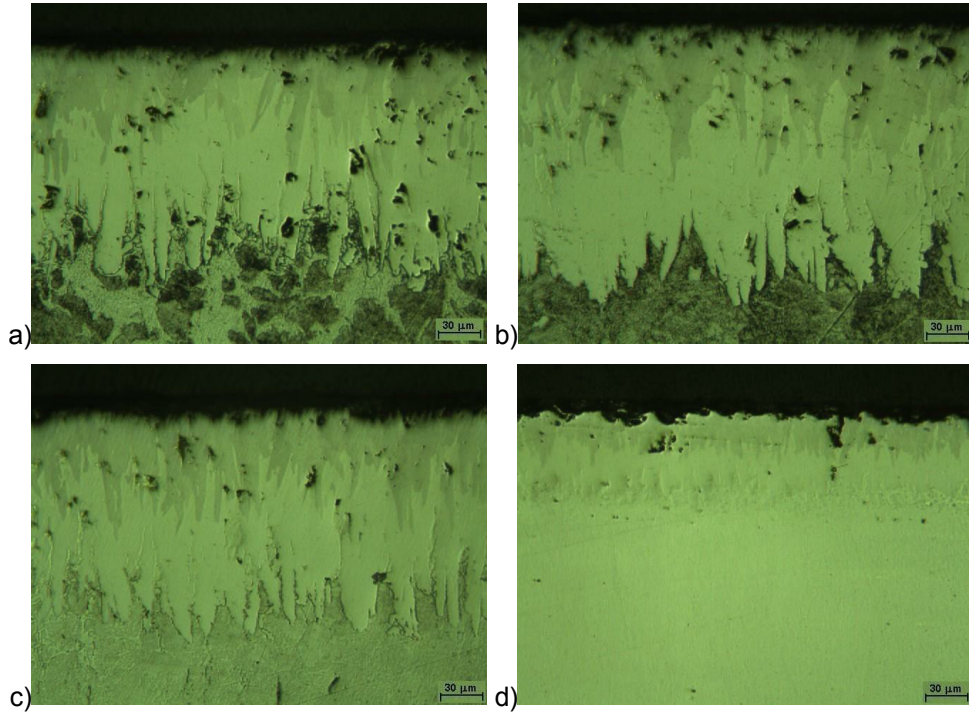
Şekil 7.1.12. 900°C' de 8 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.



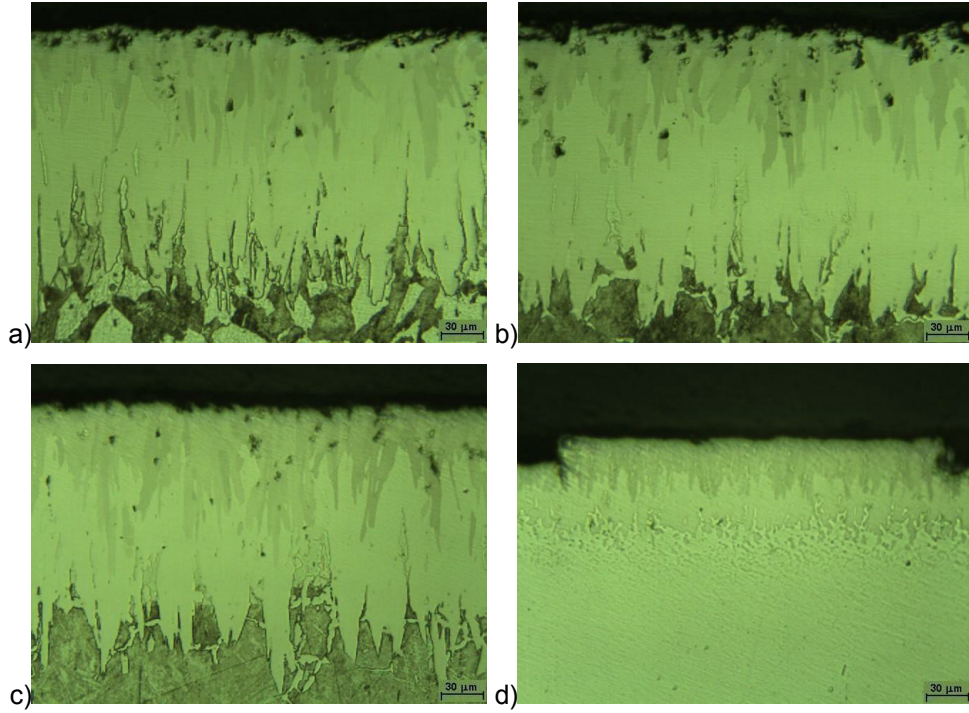
Şekil 7.1.13. 940°C' de 2 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.



Şekil 7.1.14. 940°C' de 4 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları.



Şekil 7.1.15. 940°C' de 6 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları



Şekil 7.1.16. 940°C' de 8 saat borlanmış a) AISI 1020, b) AISI 1040, c) AISI 4140 ve d) AISI H13 çeliklerine ait iç yapı fotoğrafları

7.2.Tabaka Kalınlıkları

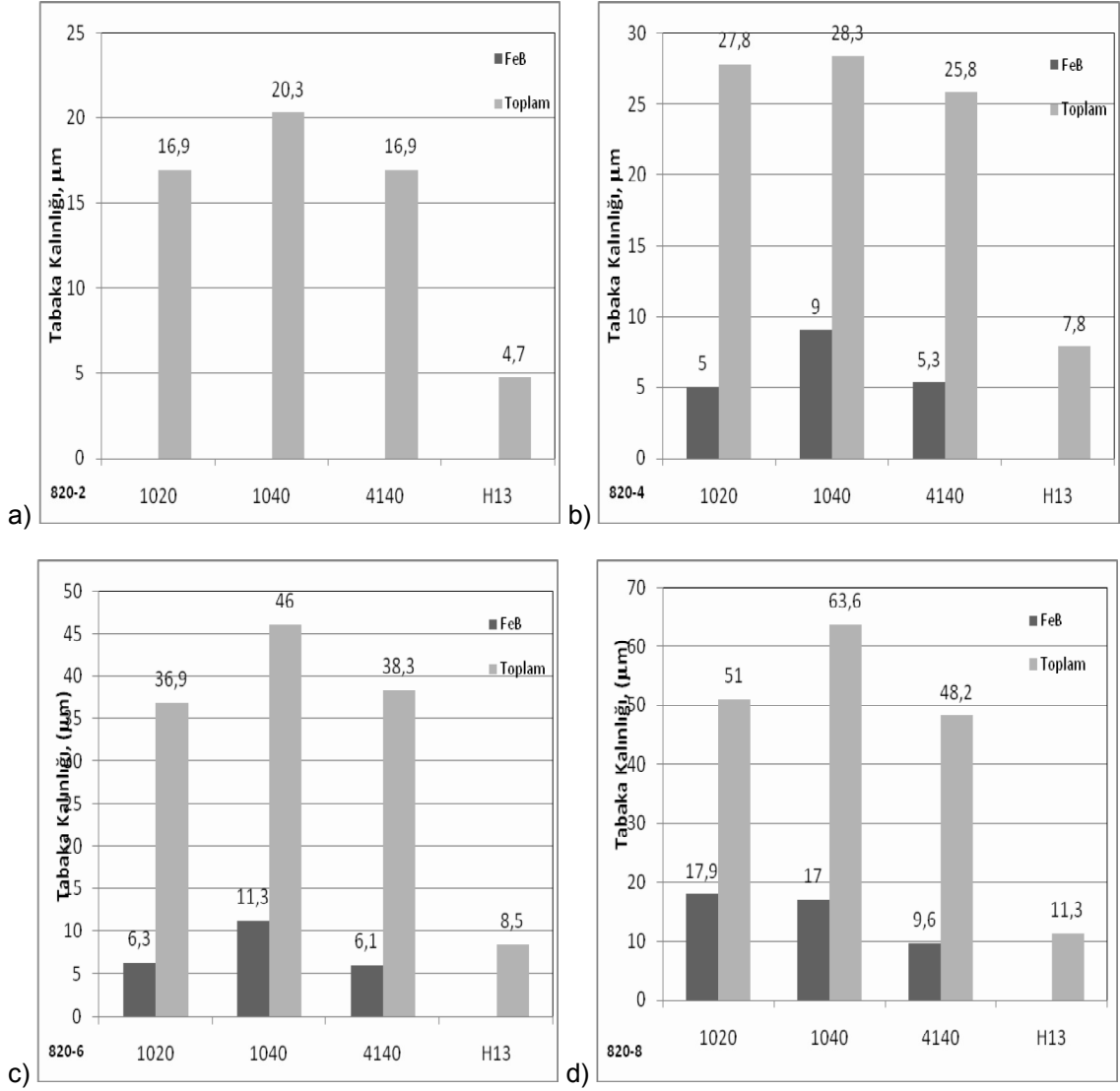
Oluşan borür tabakalarının kalınlıkları Şekil 7.2.1 - 7.2.4 'de karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Aynı sıcaklık ve sürede borlanan çeliklerde borür tabakası gelişimi aynı değildir. Borür tabakası kalınlığının hangi etkenlere göre farklılık gösterdiğini anlayabilmek için sırasıyla borlama süresini, borlanan malzemeyi ve borlama sıcaklığını sabit tutarak grafikler çizilmiştir.

Borlama sıcaklığına ve borlanan malzemeye bağlı borür tabaka kalınlıkları değişimleri Şekil 7.2.5 – 7.2.8 'de verilmiştir. Her iki tip borür tabakasında işlem sıcaklığının artması tabaka kalınlığını arttırmaktadır. Alaşım elementi oranı fazla olan AISI H13 çeliğinde oluşan borür tabakaları diğer çeliklere göre daha az gelişmiştir. En kalın tabakanın AISI 1040 çeliğinde olduğu ve sırasıyla AISI 1020 ve AISI 4140 çeliklerinin takip ettiği söylenebilir.

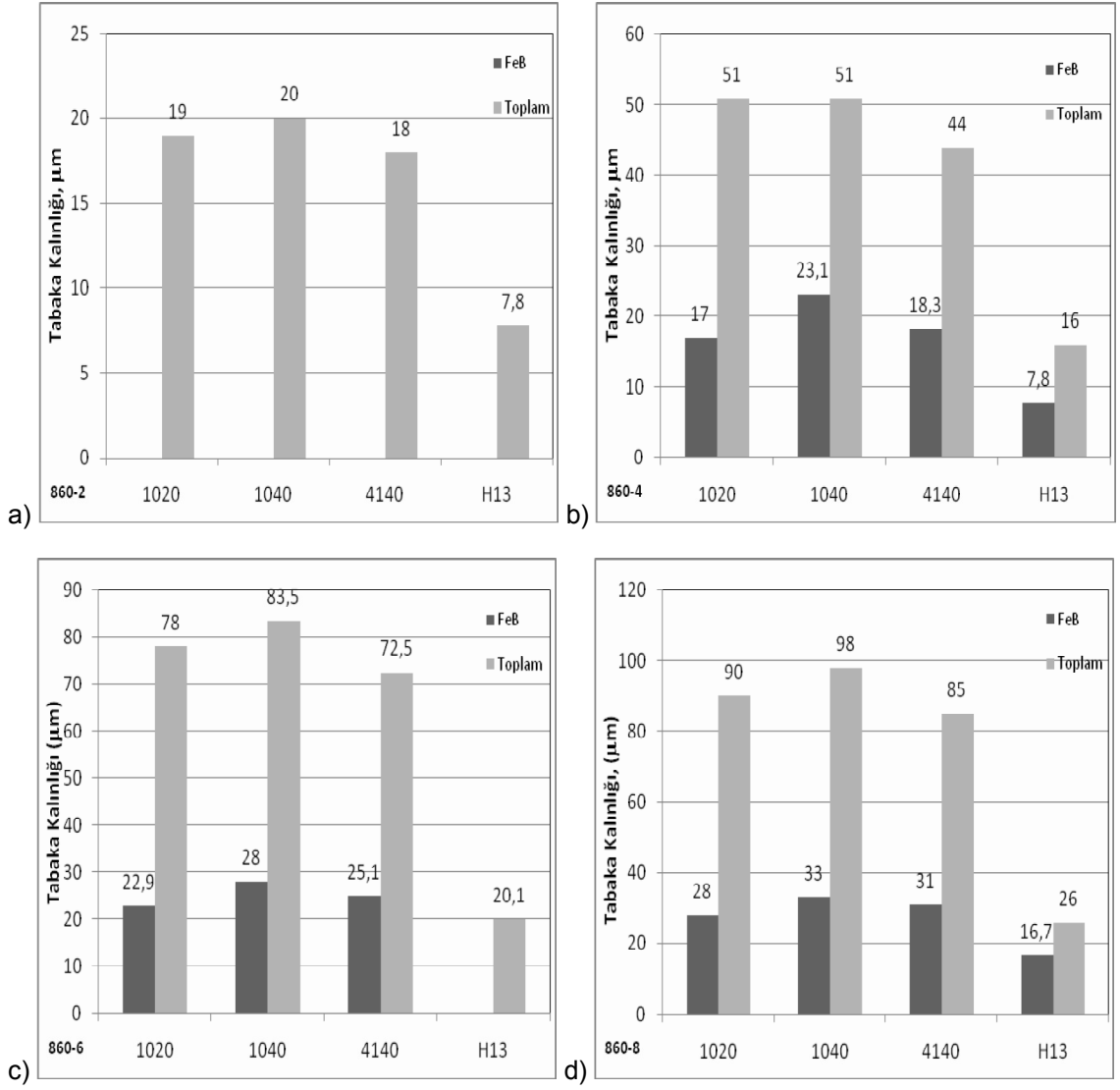
Borlama süresi ve sıcaklığına bağlı borür tabaka kalınlıklarının değişimleri Şekil 7.5.9 – 7.5.12 'de gösterilmiştir. Her iki tip borür tabakasının işlem sıcaklığı ile arttığı görülmektedir aynı zamanda tüm çeliklerde borlama süresinin artması da kalınlılığı arttırmıştır.

Borlanan malzemeye ve süresine bağlı borür tabaka kalınlıklarının değişimleri Şekil 7.5.13 – 7.5.16 'da gösterilmiştir. Artan sıcaklıkla borür tabakası gelişiminin de parabolik olarak arttığı görülmektedir. Başlangıçta hızlı gelişen bor difüzyonu zamanla ortamdaki bor

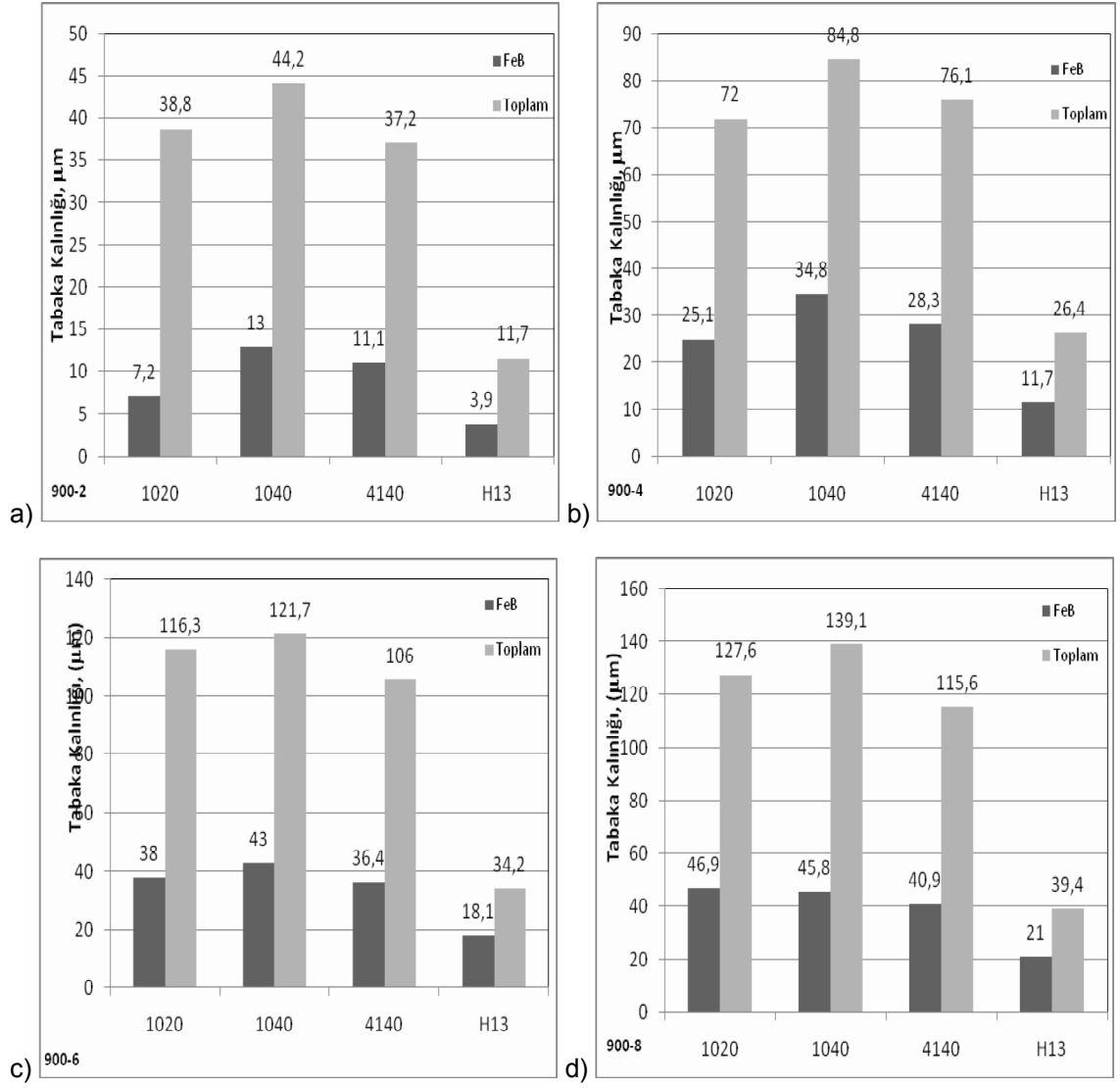
konsantrasyonunun azalması ve oluşan tabakanın bor difüzyonunu zorlaştırması ile yavaşlamaktadır. Malzeme açısından bakılacak olursa karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerde birbirine çok yakın borür tabakası kalınlıkları elde edilirken yüksek alaşımlı H13 çeliğinde diğerlerinde oldukça az oranda borür tabakası gelişimi elde edilmiştir.



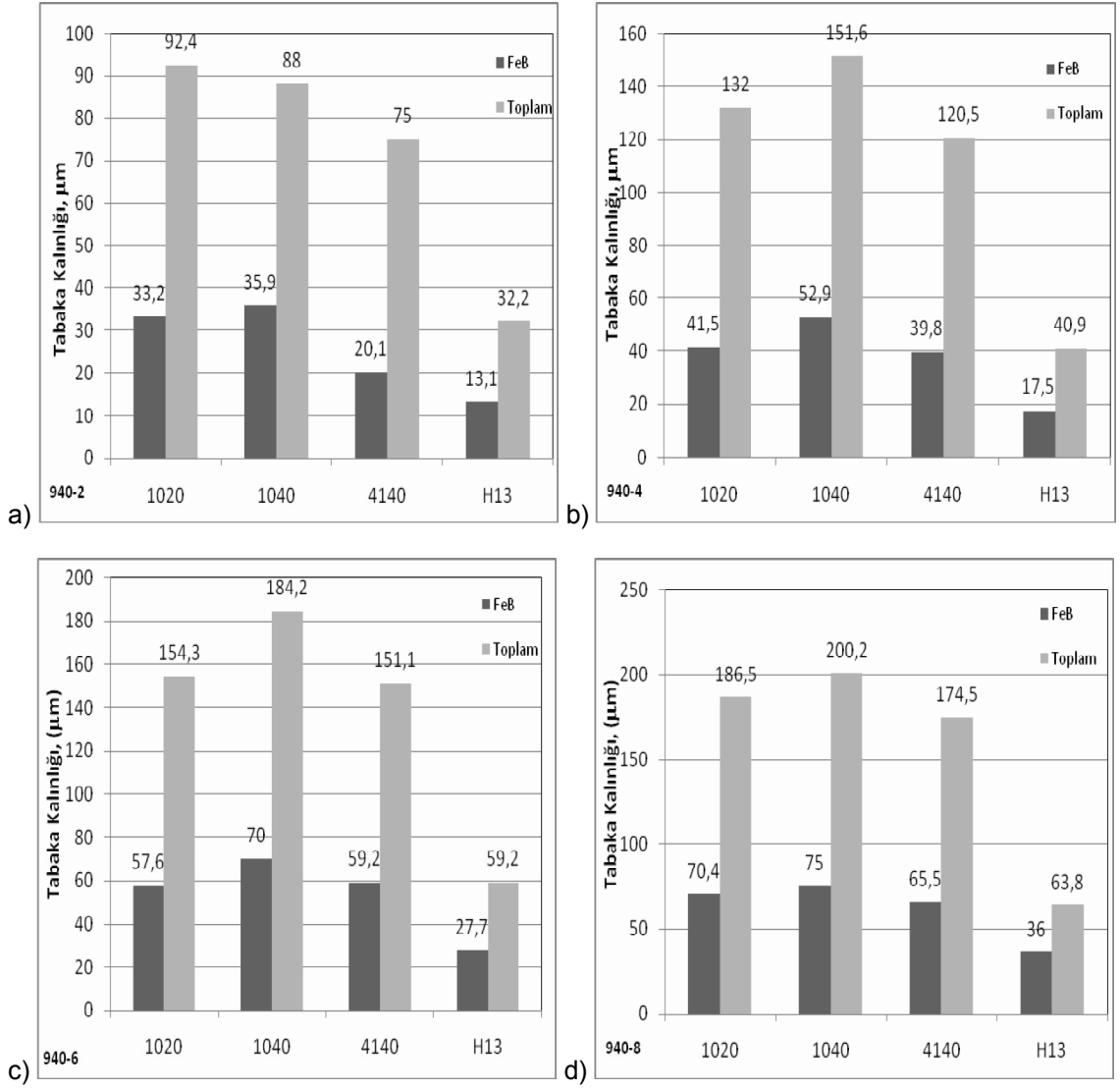
Şekil 7.2.1 . 820°C sıcaklıkta a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat d) 8 saat süreyle borlanmış çeliklerdeki FeB tabakası ve toplam tabaka kalınlığı değişimi.



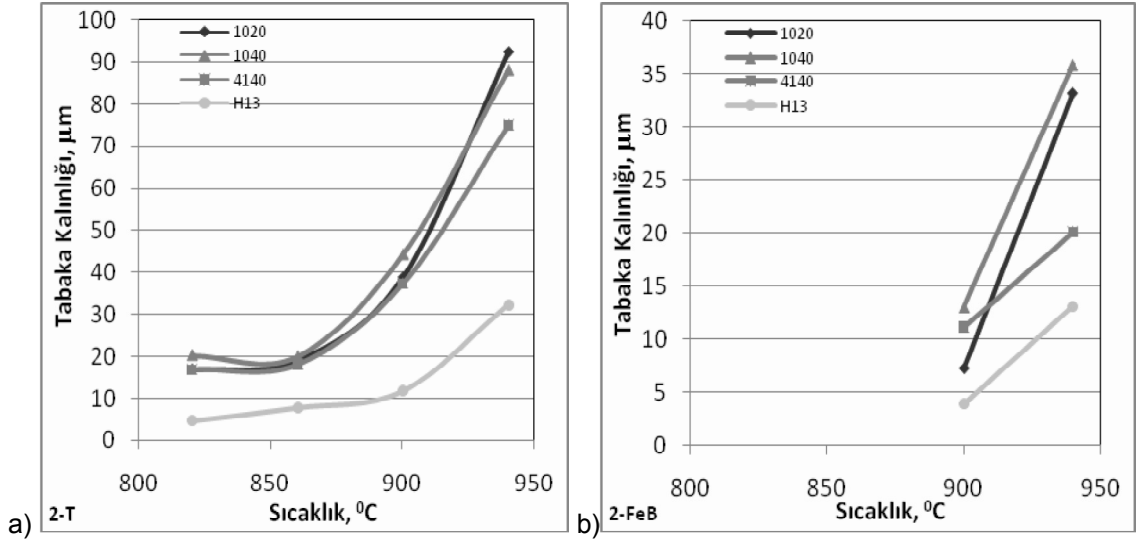
Şekil 7.2.2 . 860°C sıcaklıkta a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat d) 8 saat süreyle borlanmış çeliklerdeki FeB tabakası ve toplam tabaka kalınlığı değişimi.



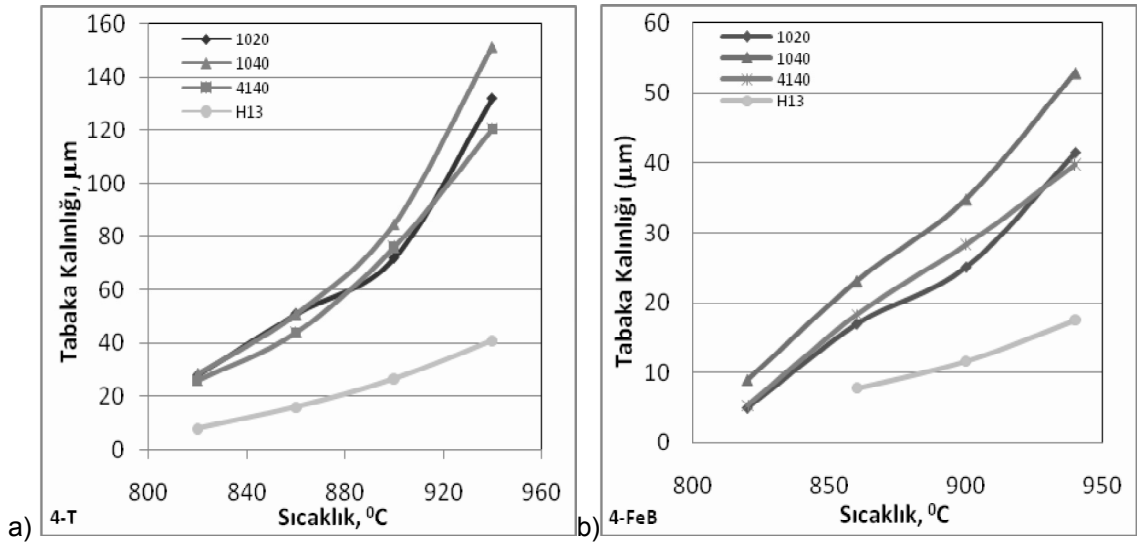
Şekil 7.2.3 . 900°C sıcaklıkta a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat d) 8 saat süreyle borlanmış çeliklerdeki FeB tabakası ve toplam tabaka kalınlığı değişimi.



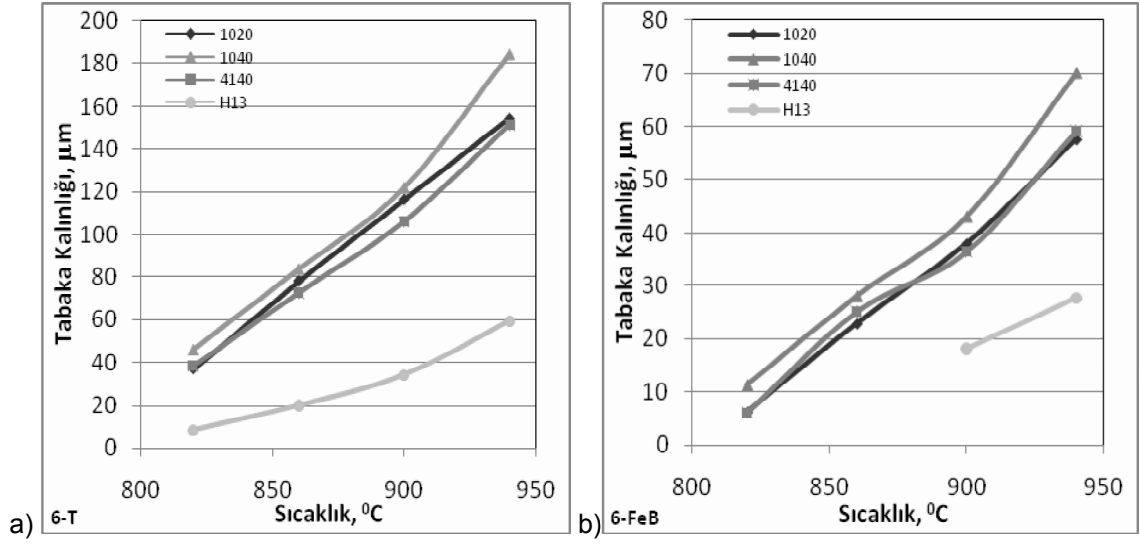
Şekil 7.2.4 . 940°C sıcaklıkta a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat d) 8 saat süreyle borlanmış çeliklerdeki FeB tabakası ve toplam tabaka kalınlığı değişimi.



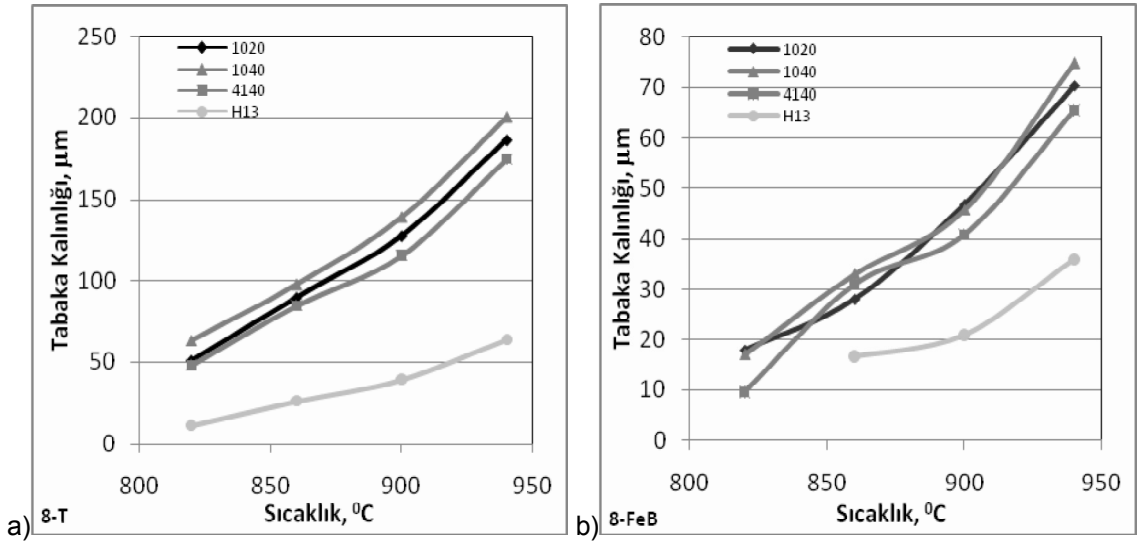
Şekil 7.2.5 . 2 saat borlama için malzeme sıcaklığına bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.



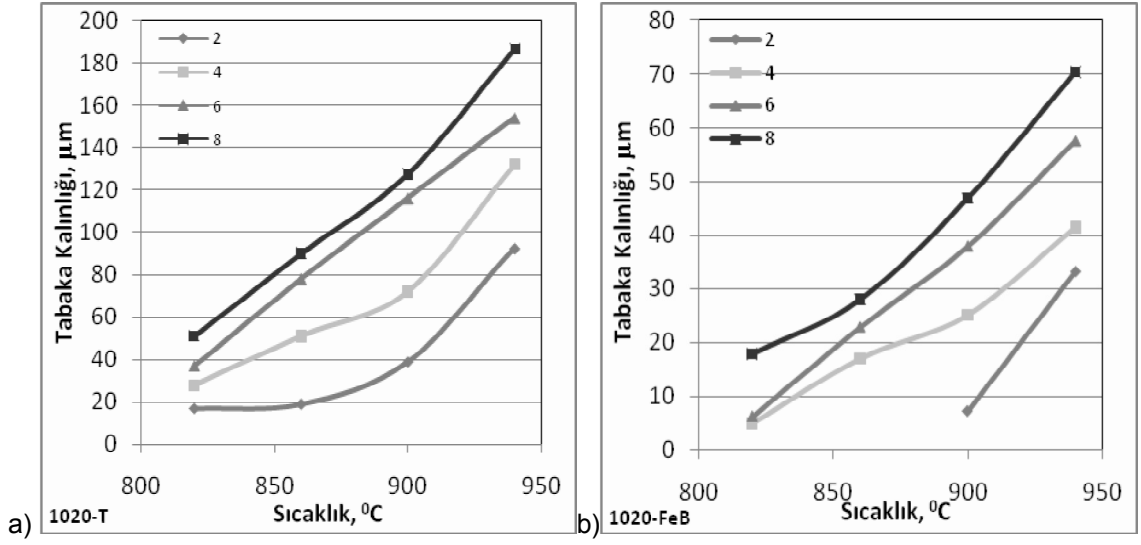
Şekil 7.2.6 . 4 saat borlama için malzeme sıcaklığına bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.



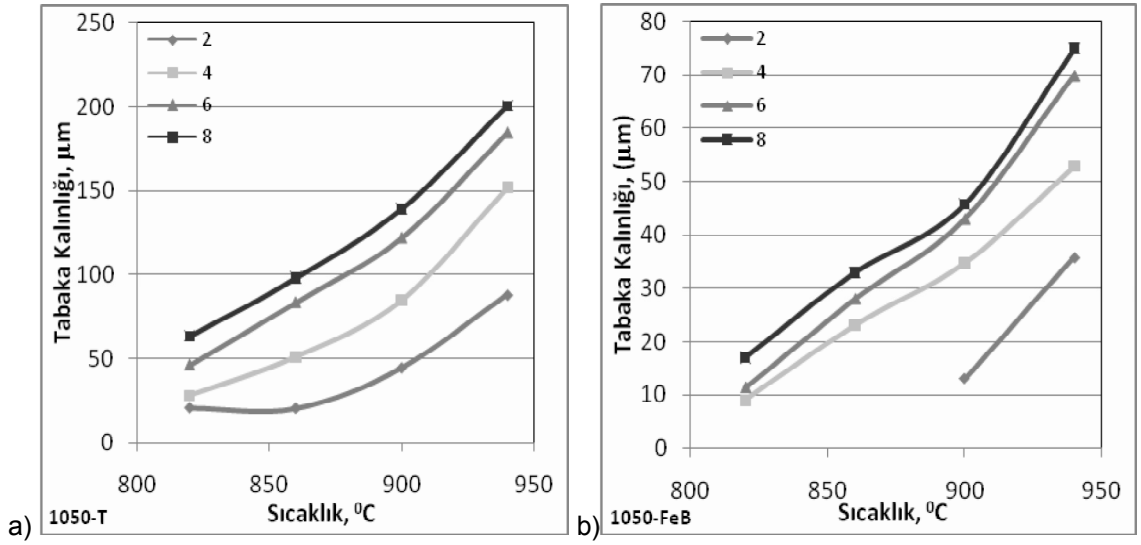
Şekil 7.2.7 . 6 saat borlama için malzeme sıcaklığına bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b) FeB tabakası değişimi.



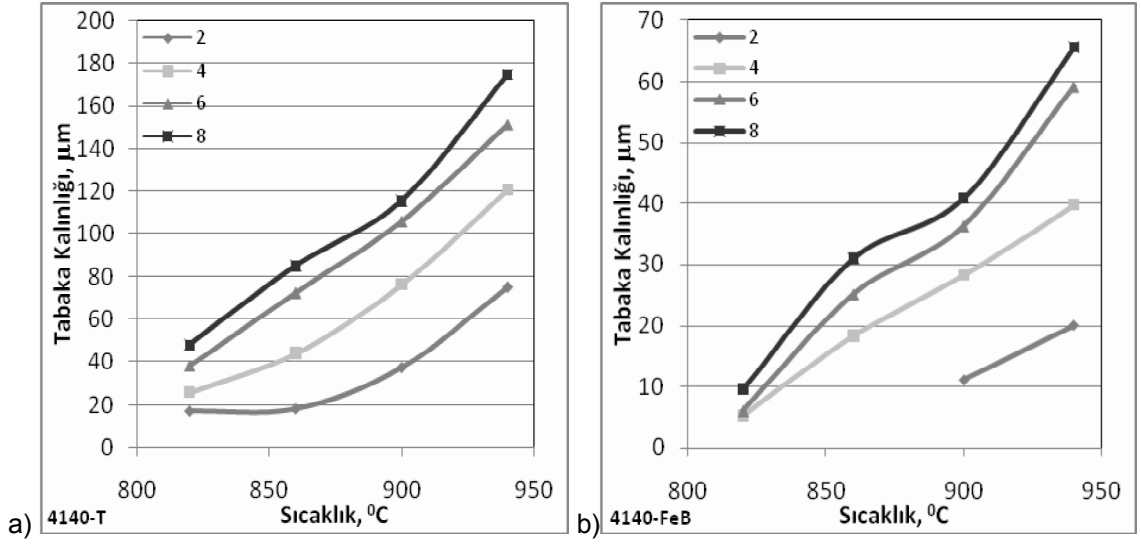
Şekil 7.2.8 . 8 saat borlama için malzeme sıcaklığına bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b) FeB tabakası değişimi.



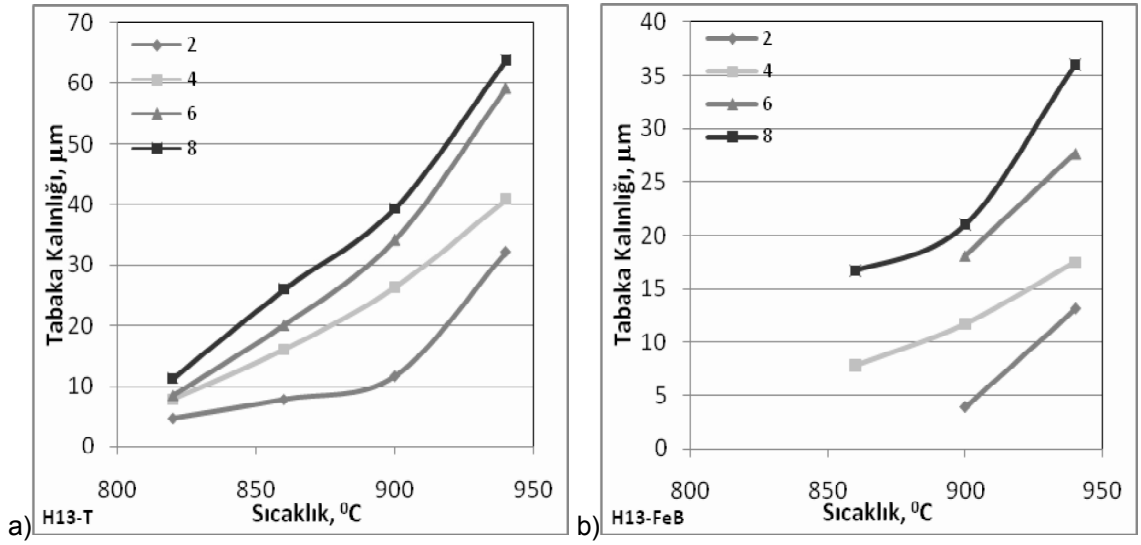
Şekil 7.2. 9 . AISI 1020 için sıcaklık-borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.



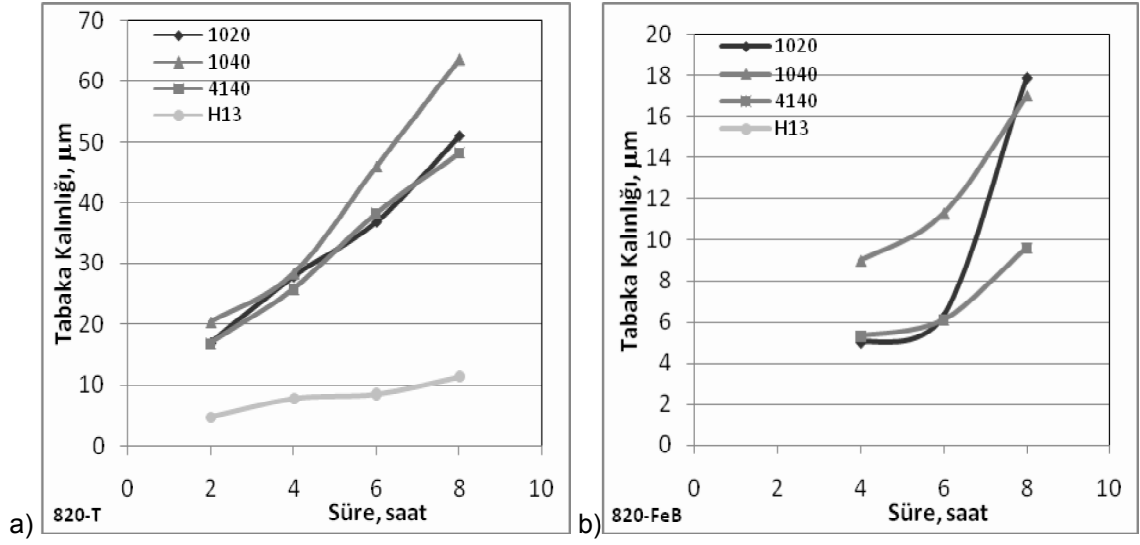
Şekil 7.2.10. AISI 1040 için sıcaklık-borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.



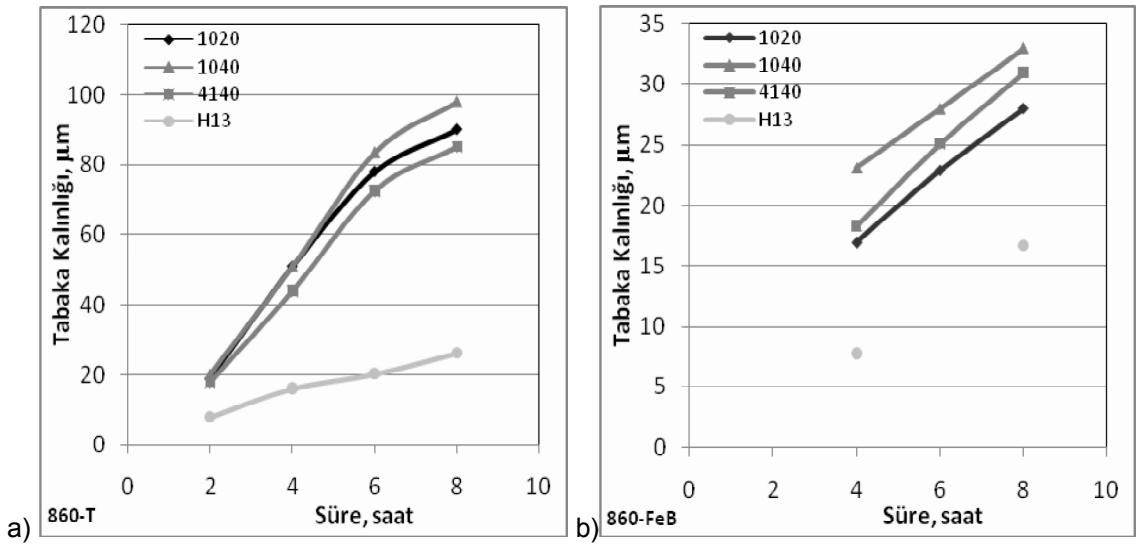
Şekil 7.2.11. AISI 4140 için sıcaklık-borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.



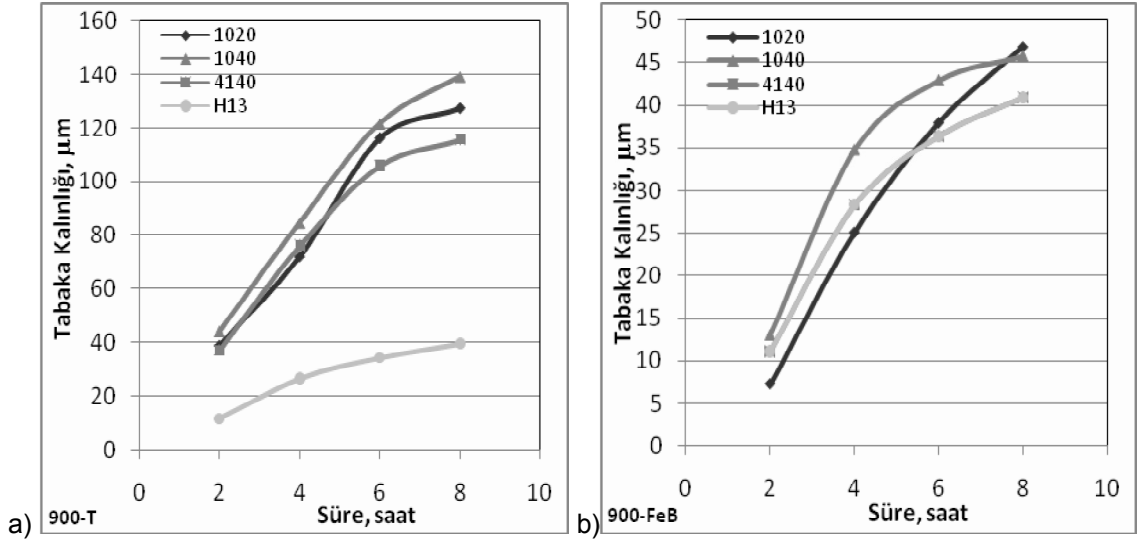
Şekil 7.2.12. AISI H13 için sıcaklık-borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.



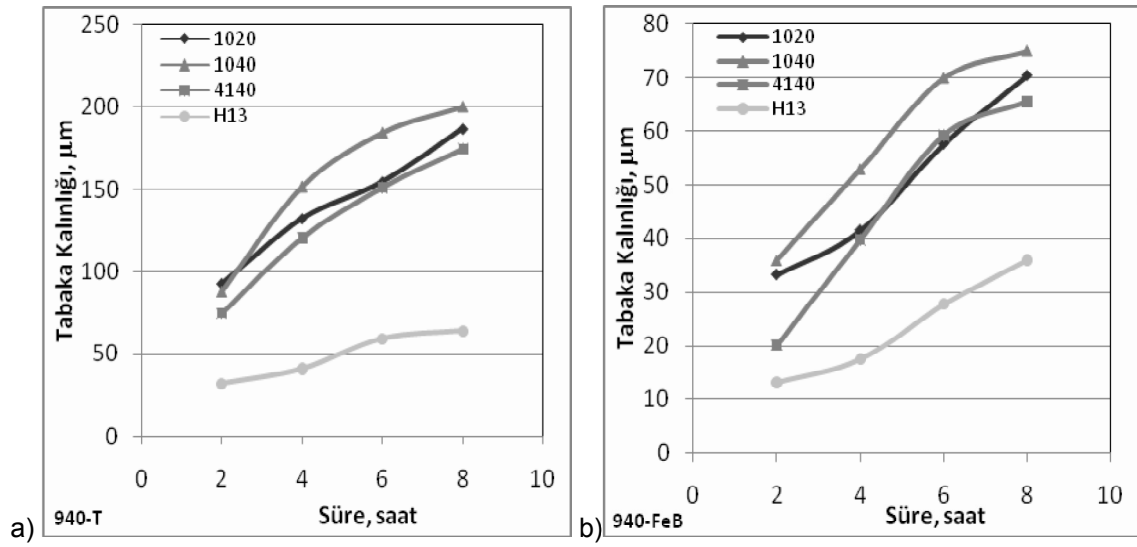
Şekil 7.2.13. 820°C' de malzeme ve borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.



Şekil 7.2.14. 860°C' de malzeme ve borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.



Şekil 7.2.15. 900°C' de malzeme ve borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.



Şekil 7.2.16. 940°C' de malzeme ve borlama süresine bağlı a) Toplam tabaka kalınlığı b)FeB tabakası değişimi.

7.3. Sertlik Ölçümü

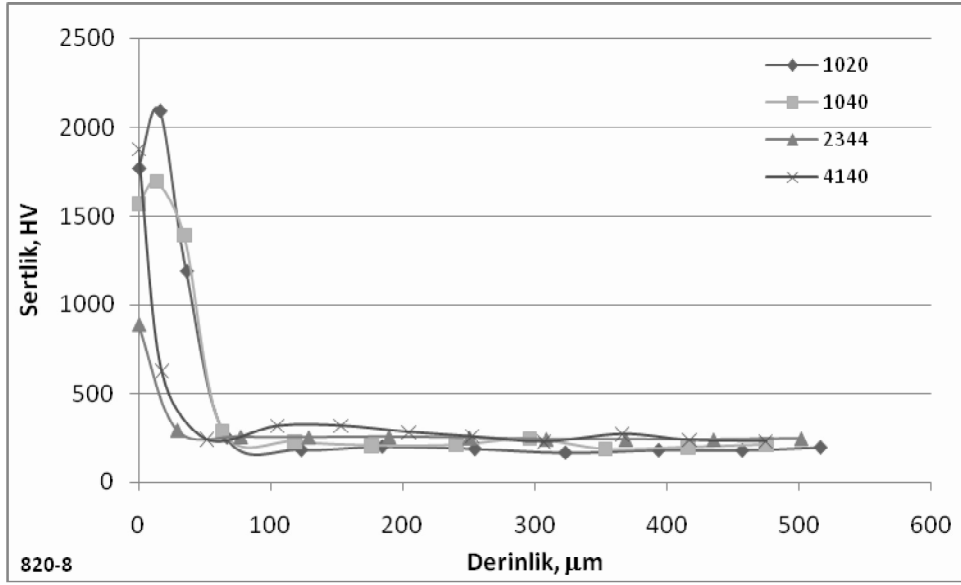
Borlanmış numunelerin yüzeyden derine doğru sertlik değişim değerleri Şekil 7.3.1 – 7.3.4 'de ifade edilmiştir.

820 °C sıcaklıkta 8 saat süreyle borlanmış numunelerin sertlik değişim grafiği Şekil 7.3.1 'de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, en yüksek sertliğe 1020 malzemesinde ulaşılmıştır. Elde edilen sertlik değerleri oluşan fazla ilgilidir. 820 °C' de belirgin olarak FeB fazı AISI 1020 malzemesinde elde edilmiştir. FeB fazı Fe₂B fazına göre daha fazla B içermekte ve daha sert bir fazdır.

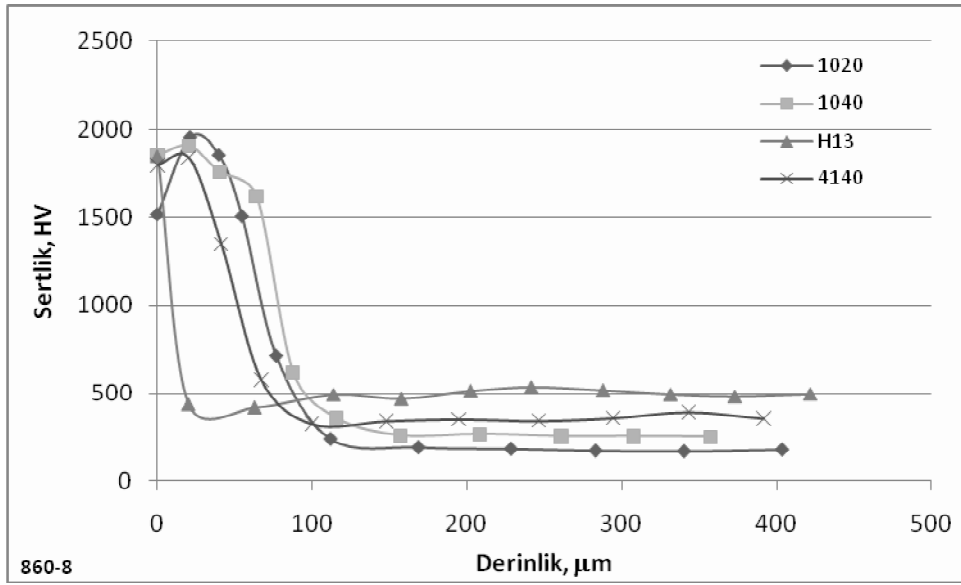
860 °C sıcaklıkta 8 saat süreyle borlanmış numunelerin sertlik değişim grafiği Şekil 7.3.2' de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, tüm malzemeler için borlama tabakasında yapılan ölçümlerde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ama yüksek oranda alaşım elementi içeren H13 çeliğinde sertlik derinliği AISI 1020, AISI 1040 ve AISI 4140'a göre daha düşük bulunmuştur.

900 °C sıcaklıkta 8 saat borlanmış numunelerin sertlik değişim grafiği Şekil 7.3.3 'de verilmiştir. Sonuçlara göre, tüm malzemeler için borlama tabakasında yapılan ölçümlerde yüzeye yakın derinliklerde çok yakın sertlik değerleri elde edilmiştir. Ancak malzemelerin alaşım elementleri ve C oranlarına göre sertlik derinlikleri farklılık göstermektedir. Bu durum iç yapı fotoğrafları ve tabaka kalınlık eğrileri ile uyum içerisindedir.

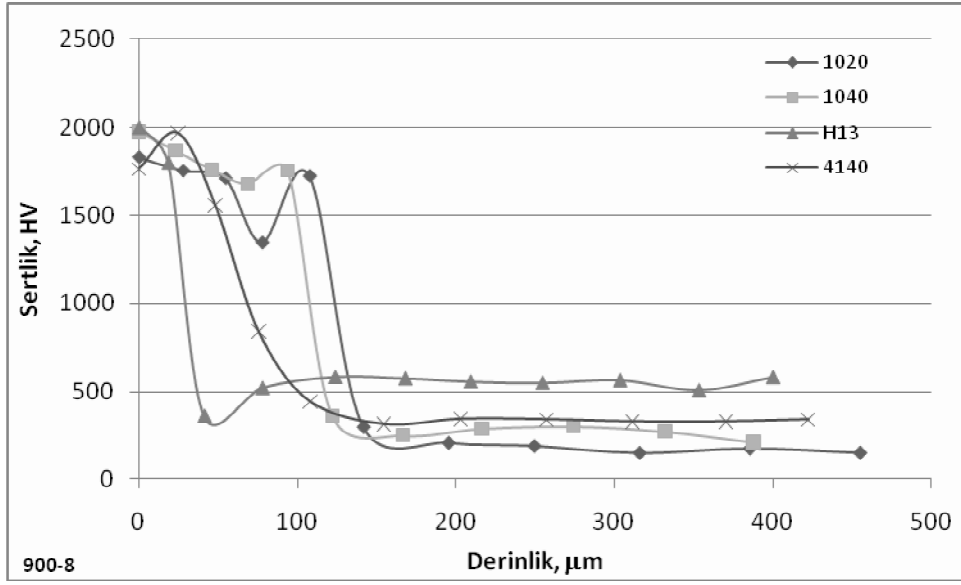
940 °C sıcaklıkta 8 saat borlanmış numunelerin sertlik değişim grafiği Şekil 7.3.4 'de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, tüm malzemeler için borlama tabakasında yapılan ölçümlerde birbirine yakın sertlik değerleri elde edilmiştir. Ancak alaşım elementleri içeren AISI 4140 ve AISI H13 malzemelerinde sertlik derinliği, AISI 1020 ve AISI 1040'a göre daha düşük bulunmuştur. AISI H13 'te AISI 4140 'a göre daha fazla alaşım elementi bulunduğu için sertlik derinliği H13'te belirgin şekilde en düşüktür. Yüksek sıcaklık etkisiyle B difüzyonu daha hızlı olması daha büyük tabaka kalınlıklarının oluşumuna dolayısıyla daha derin sertlik değerleri oluşmasına neden olmuştur.



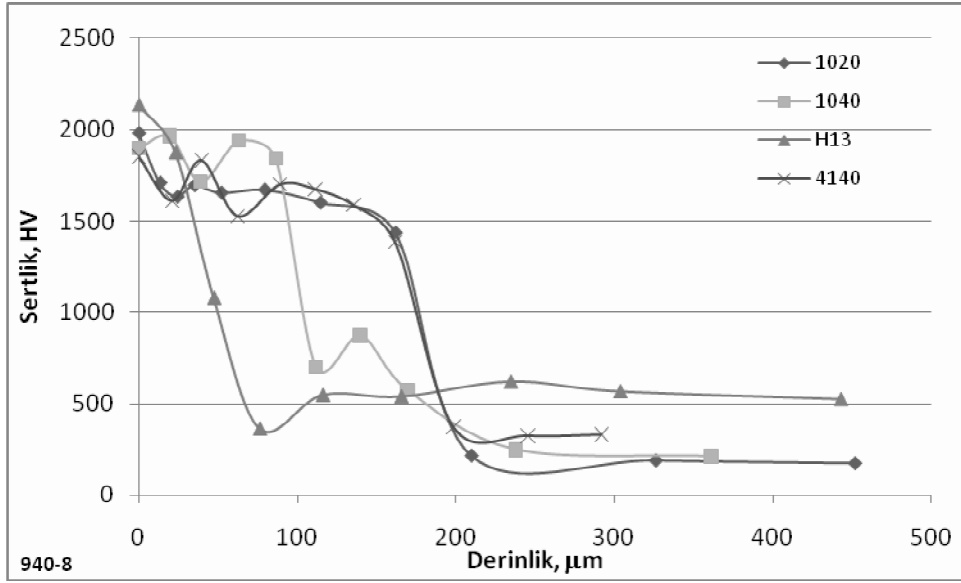
Şekil 7.3.1 . 820 °C sıcaklıkta 8 saat süreyle borlanan malzemelerin borlama süresine bağlı sertlik değişimleri



Şekil 7.3.2 .860 °C sıcaklıkta 8 saat süreyle borlanan malzemelerin borlama süresine bağlı sertlik değişimleri



Şekil 7.3.3 . 900 °C sıcaklıkta 8 saat süreyle borlanan malzemelerin borlama süresinebağlı sertlik değışimleri



Şekil 7.3.4 . 940 °C sıcaklıkta 8 saat süreyle borlanan malzemelerin borlama süresine bağli sertlik değışimleri

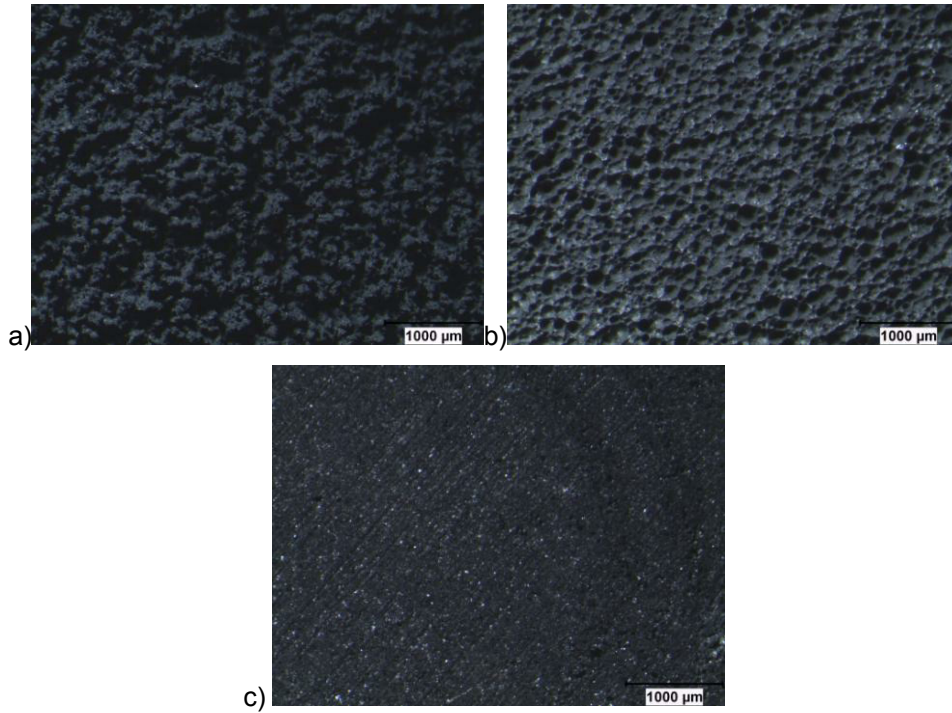
7.4. Korozyon Deneyi

Asit ve su içerisinde borür tabakalarının korosif dirençlerini belirme amacıyla yapılan korozyon deneyi süresince elde edilen yüzey fotoğrafları Şekil 7.4.1 – 7.4.9 'da gösterilmiştir.

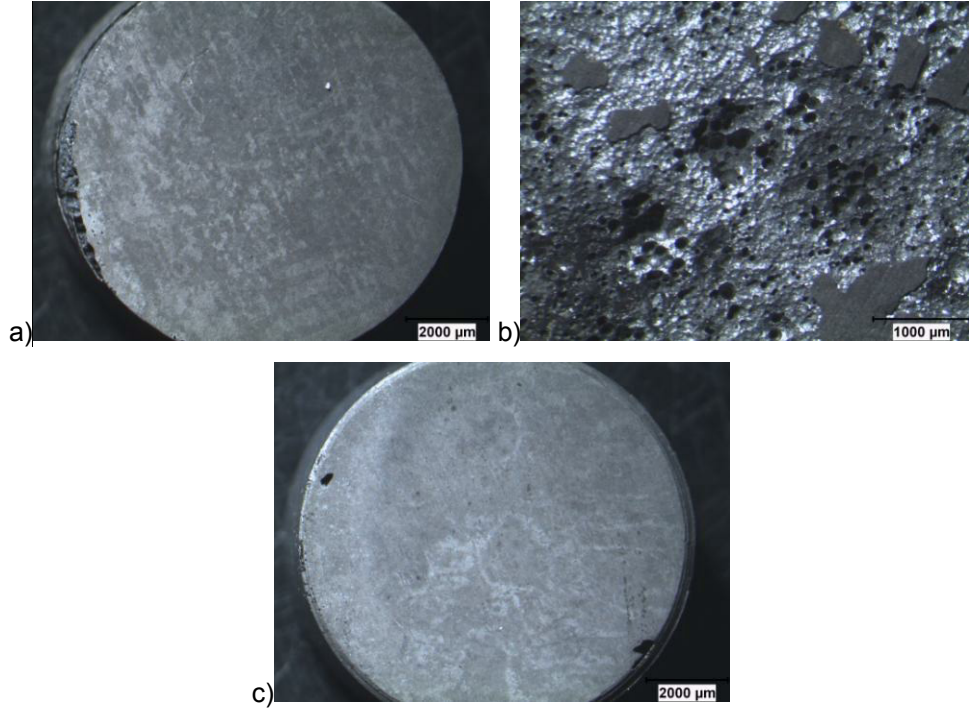
Şekil 7.4.1 'da 3 gün boyunca asit ortamında bekletilen borlanmamış çeliklerin yüzeylerinde meydana gelen çukurcuklar kolaylıkla görülebilmektedir. Asidin etkisiyle zayıflayan bağlar zamanla koparak çeliğin türüne göre farklı biçimlerde çukurcuklar oluşturmuştur.

Şekil 7.4.2, 7.4.3, 7.4.4, 7.4.5 'teki gibi 860 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle borlanan yüzeylerdeki 3 gün boyunca asitle etkileşim ise AISI H13 çeliği dışında yok sayılabilir. Bazı çeliklerin de yanal kısımlarında borür tabakasının kırıldığı görülmektedir. Bu kısımlarda oluşan kırılmaların sebebi olarak keskin köşelerdeki borür tabakalarının zayıflığı söylenebilir. AISI H13 çeliğinde ise borür tabakası asit tarafından aşındırılarak tabakayı yüzeyden uzaklaştırmıştır.

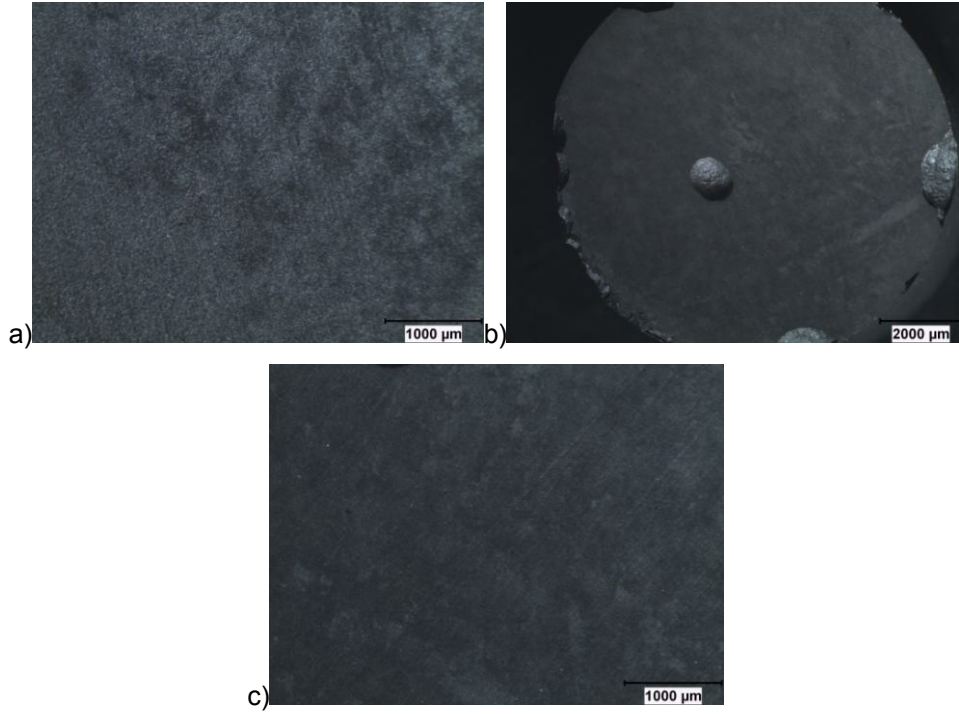
14 gün boyunca su ortamında bekletilen borlanmamış ve 900 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle borlanmış çeliklerin yüzey görüntüleri Şekil 7.4.6 -7.4.9 'da verilmiştir. Asit içerisinde 14 gün kaldıktan sonra borlanmış AISI H13 çeliğinin yüzeyinde borür tabakasının kalmadığı dikkat çekmektedir. Su içerisinde kalan çeliklerin yüzey görüntülerinde değişim görülmemektedir.



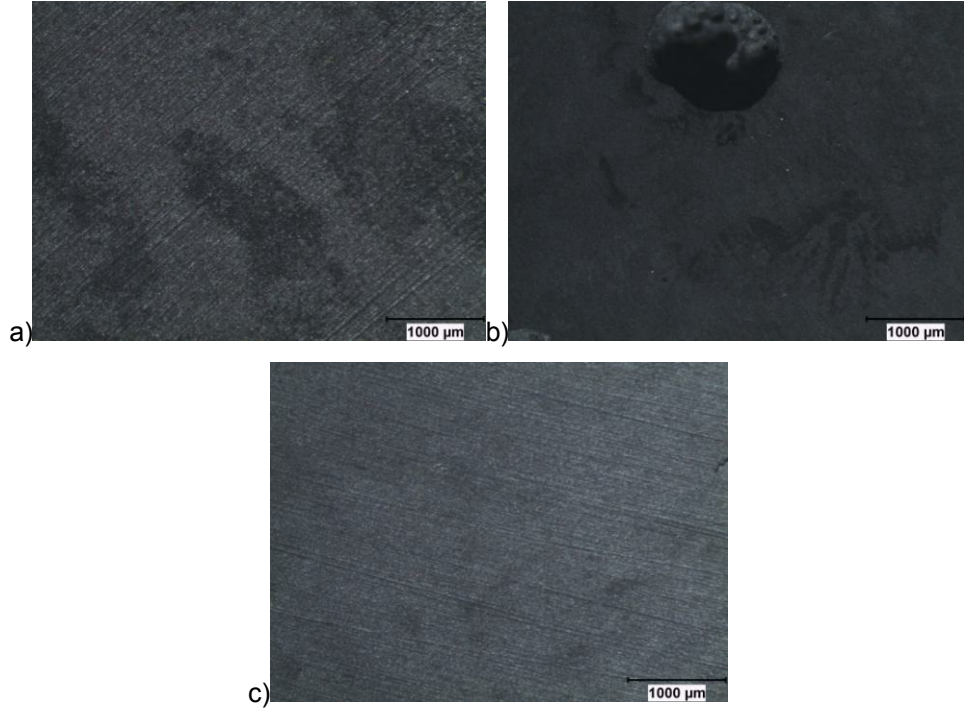
Şekil 7.4. 1 . 3 gün boyunca asit ortamında bekletilen borlanmamış a) AISI 1040 b) AISI H13 c) AISI 4140 çeliklerinin yüzey görüntüleri.



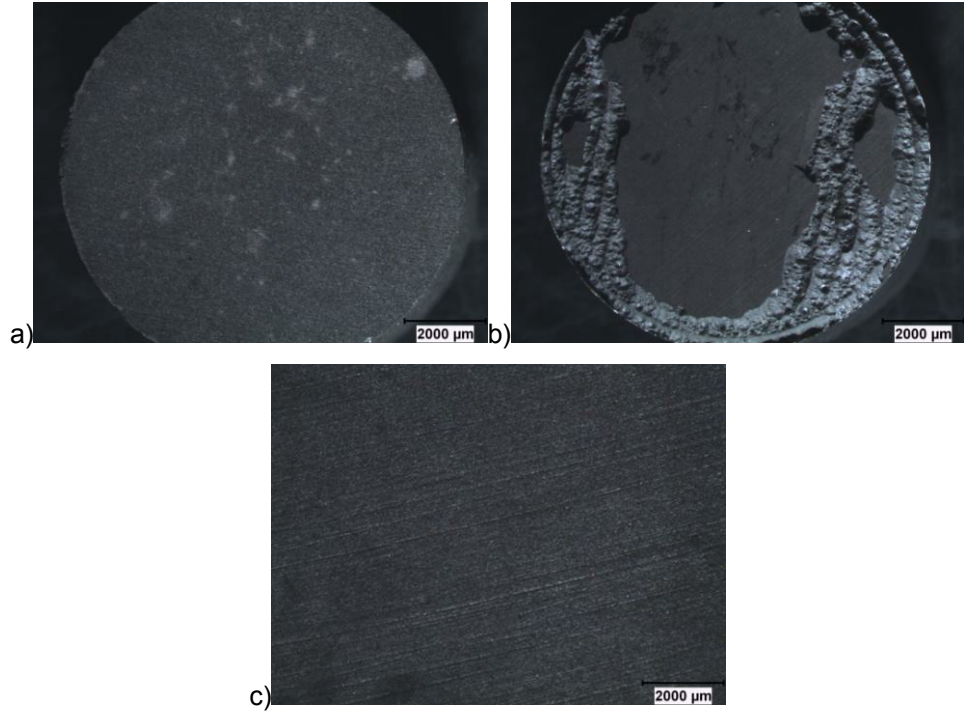
Şekil 7.4.2 . 3 gün boyunca asit ortamında bekletilen 860 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle borlanmış a) AISI 1040 b) AISI H13 c) AISI 4140 çeliklerinin yüzey görünümleri.



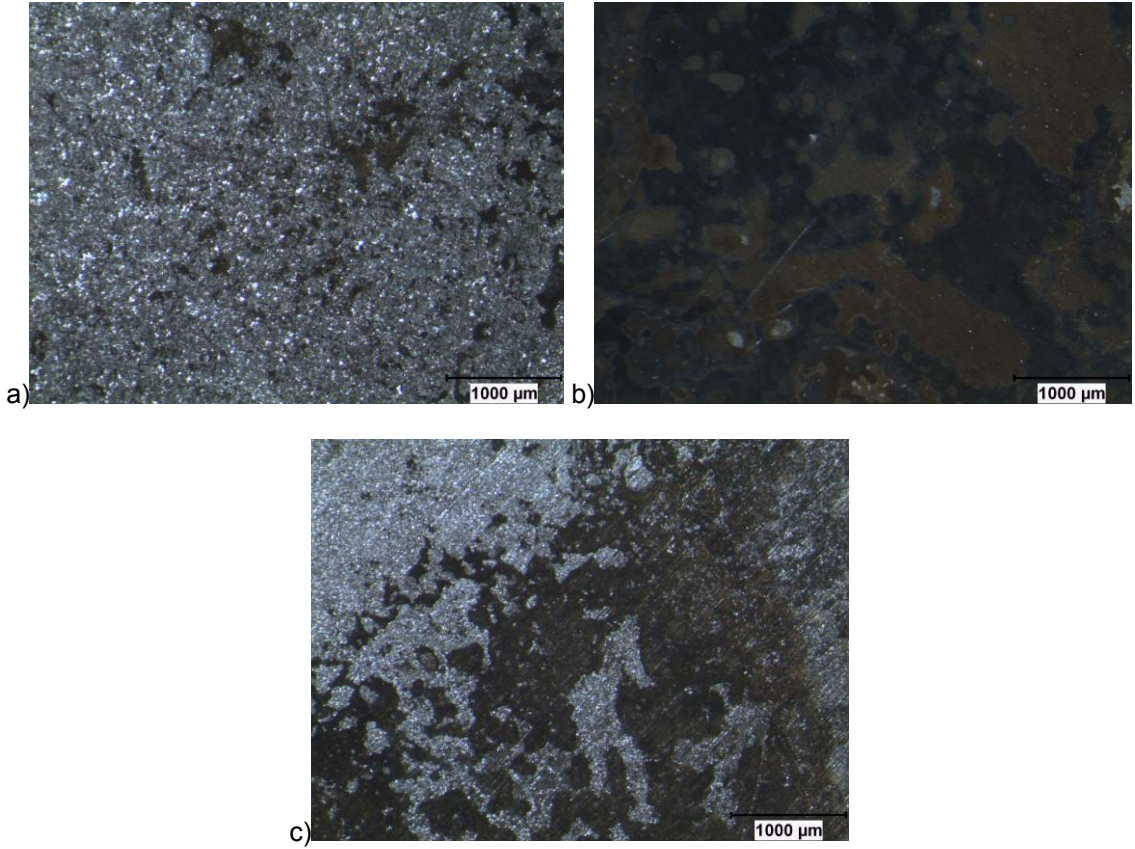
Şekil 7.4.3 . 3 gün boyunca asit ortamında bekletilen 860 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle borlanmış a) AISI 1040 b) AISI H13 c) AISI 4140 çeliklerinin yüzey görünümleri.



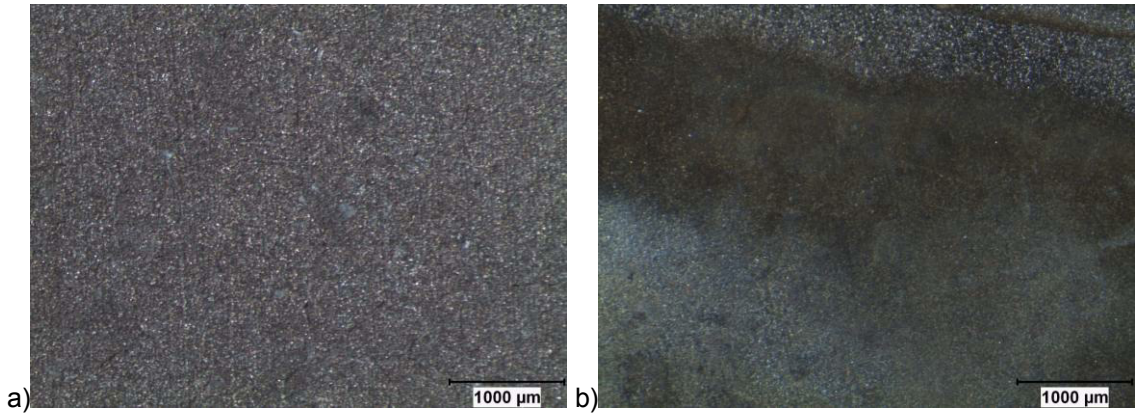
Şekil 7.4.4 . 3 gün boyunca asit ortamında bekletilen 900 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle borlanmış a) AISI 1040 b) AISI H13 c) AISI 4140 çeliklerinin yüzey görünümleri.



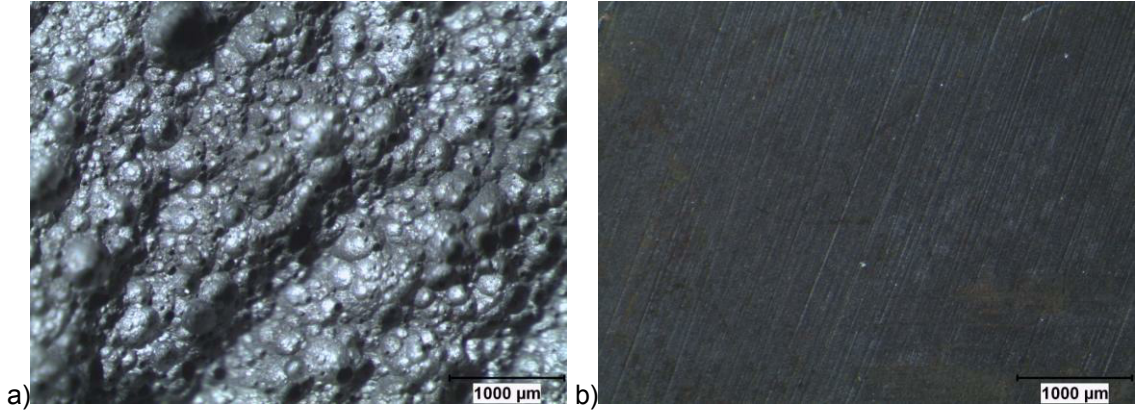
Şekil 7.4.5 . 3 gün boyunca asit ortamında bekletilen 900 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle borlanmış a) AISI 1040 b) AISI H13 c) AISI 4140 çeliklerinin yüzey görünümleri.



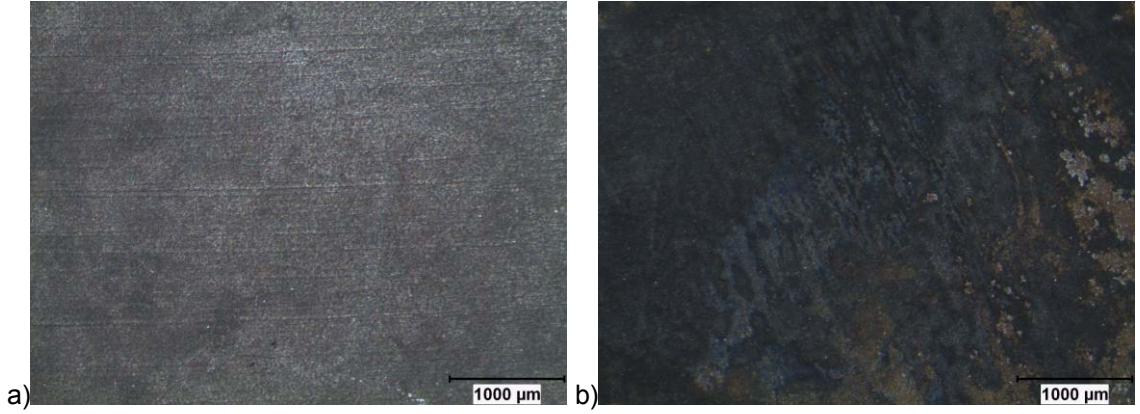
Şekil 7.4.6 .14 gün boyunca su ortamında bekletilen borlanmamış a) AISI 1040 b) AISI H13 c) AISI 4140 çeliğinin yüzey görünümü.



Şekil 7.4.7 . 14 gün boyunca a) asit b) su ortamında bekletilen 900 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle borlanan AISI 1040 çeliğinin yüzey görünümü.



Şekil 7.4. 8 . 14 gün boyunca a) asit b) su ortamında bekletilen 900 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle borlanan AISI H13 çeliğinin yüzey görünümü.



Şekil 7.4. 9 . 14 gün boyunca a) asit b) su ortamında bekletilen 900 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle borlanan AISI 4140 çeliğinin yüzey görünümü.

Elde edilen kütle kayıpları grafik halinde Şekil 7.4.10 – 7.4.17 arasında verilmiştir. Grafikler üzerinde her bir parametre için toplam borür tabakası kalınlıkları ($Fe_2B + FeB$) parantez içerisinde μm cinsinden belirtilmiştir. Borlanmış ve borlanmamış çeliklerin korozyon sıvılarına karşı tepkisi kütle kaybı cinsinden verilmiştir (gr/cm^2).

AISI 1040 çeliğinin su ve asit ortamında zamanla meydana gelen kütle kaybını gösteren grafik Şekil 7.4.10' dadır. Borlanmamış AISI 1040 çeliği hem su hem asit ortamında en fazla aşınmıştır. Yüzeyi bor ile kaplanmış numunelerde ise karmaşık bir durum söz konusudur. Bunun sebebi yüzey fotoğraflarıyla kıyaslandığında; numunelerin yanal yüzeylerindeki çatlaklardan tabaka altına geçen sıvılar o bölgede malzemeyi de aşındırarak fazla kütle kaybetmiştir.

AISI 4140 çeliğinin su ve asit ortamında zamanla meydana gelen kütle kaybını gösteren grafik Şekil 7.4.11' dedir. Yüzeyde borür tabakası bulunmayan çelik asit ve su içerisinde daha fazla aşınmıştır ve 7. günün sonunda ise asit içerisinde tamamen erimiştir. Yaklaşık 5. günden sonra asit, 18 µm kalınlığındaki borür tabakasının altına nüfuz etmeye başlamıştır ve korozyon aşınma hızını arttırmıştır. Kalın tabakalarda 21 gün boyunca asit tabakayı aşındırıp malzemeye geçemediği için aşınma oranı en azdır.

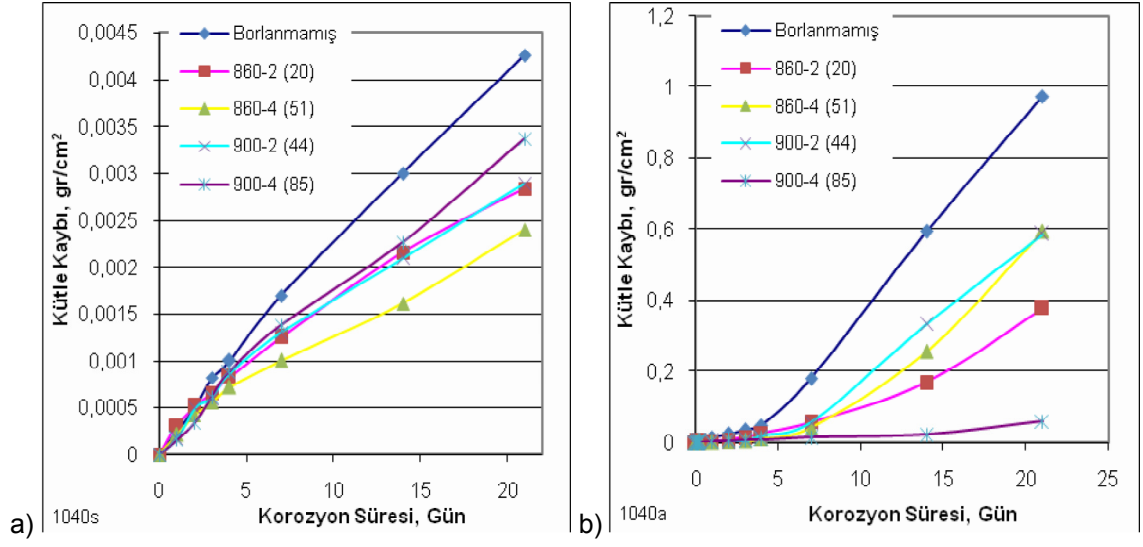
AISI H13 çeliğinin su ve asit ortamında zamanla meydana gelen kütle kaybını gösteren grafik Şekil 7.4.12' tedir. Su içerisinde kütle kaybı borlanmamış numunede fazladır. Fakat asit içerisinde bekletilen numunelerde borür tabakası dışında malzemenin de aşınması sebebiyle bir karmaşa söz konusudur. AISI H13 çeliği ince bir tabakaya sahiptir. FeB ve Fe2B ara yüzeyinde çatlaklar vardır ve bazı kısımlardan FeB tabakası koparak numune yüzeyinden ayrılmaktadır. İnce kısımlardan ya da çatlakların olduğu kısımlardan malzemeye geçen asit malzemeyi daha kolay aşındırarak daha fazla kütle kaybı oluşturmuştur.

Borlanmamış çeliklerin su ve asit ortamında zamanla meydana gelen kütle kaybını gösteren grafik Şekil 7.4.13' dedir. Çeliklerin aside kıyasla su içerisindeki kütle kayıpları çok azdır. Asit içerisinde ise AISI 4140 çeliği en fazla kütle kaybetmiştir.

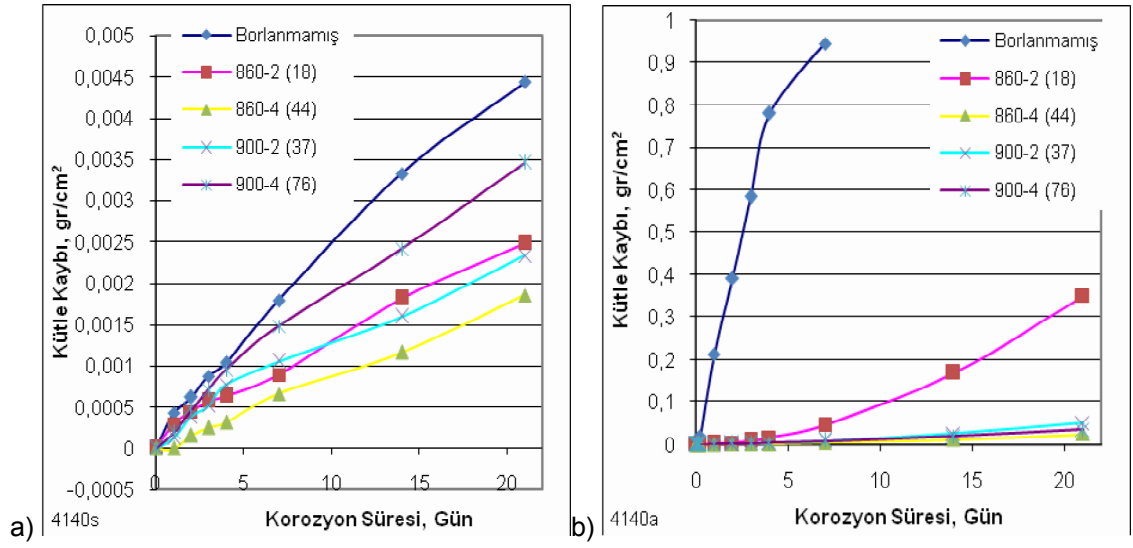
860 °C sıcaklıkta ve 2 saat boyunca borlanmış çeliklerin su ve asit ortamında zamanla meydana gelen kütle kaybını gösteren grafik Şekil 7.4.14' dedir. İnce tabakaya sahip AISI H13 çeliği asit içerisinde en fazla kütle kaybetmiştir. Çeliklerin aside karşı direnci suya kıyasla çok düşüktür. Sudaki kayıp asitteki kayıba göre yok sayılabilir. AISI 1040 ve AISI 4140 çelikleri ise asit içerisinde aynı direnci göstermişlerdir.

860 °C sıcaklıkta 4 saat ve 900 °C sıcaklıkta 2 saat boyunca borlanmış çeliklerin su ve asit ortamında zamanla meydana gelen kütle kaybını gösteren grafik Şekil 7.4.15 ve 7.4.16 ' dadır. Sudaki kütle kayıplarının en az olduğu ve AISI 1040 ve AISI H13 çeliğinin asit içerisinde en fazla kütle kaybettiği görülmektedir. AISI 1040 çeliği en fazla borür tabaka kalınlığına sahip olmasına rağmen en fazla kütle kaybeden çeliklerdendir. Buradaki büyük kütle kaybının sebebi çatlaklardan giren asidin malzemeyi aşındırmasıdır ve borür tabakasının zamanla incelmesidir. AISI 4140 çeliği ise asit içerisinde sudaki kadar iyi direnç göstermiştir.

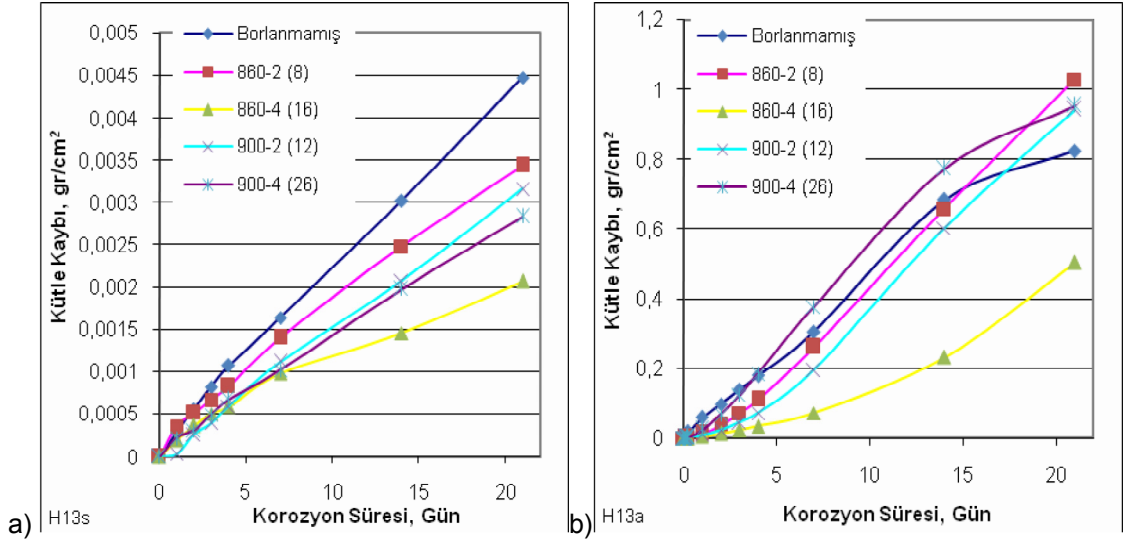
900 °C sıcaklıkta ve 4 saat boyunca borlanmış çeliklerin su ve asit ortamında zamanla meydana gelen kütle kaybını gösteren grafik Şekil 7.4.17 'dedir. İnce tabaka kalınlığına sahip AISI H13 çeliği en fazla asit içerisinde aşınan çeliktir. Yüzeyinde sağlıklı kalın borür tabakası bulunan çeliklerin asit ve su içerisinde kütle kaybı çok azdır.



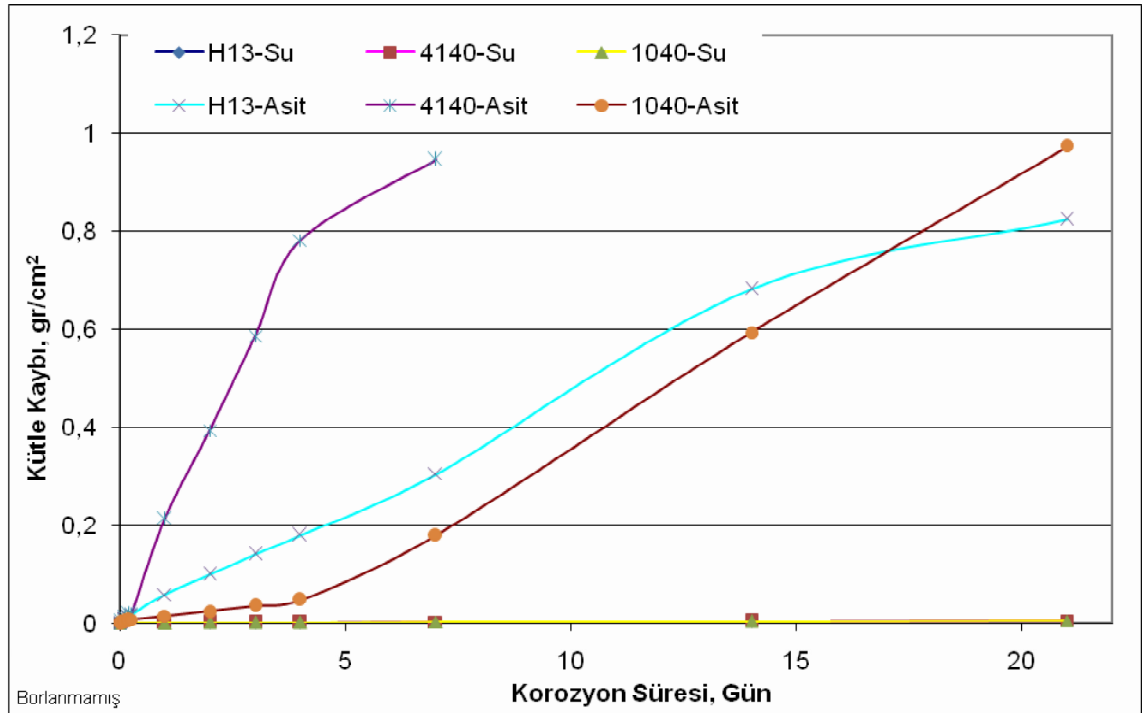
Şekil 7.4.10. AISI 1040 çeliğinin a) su b) asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.



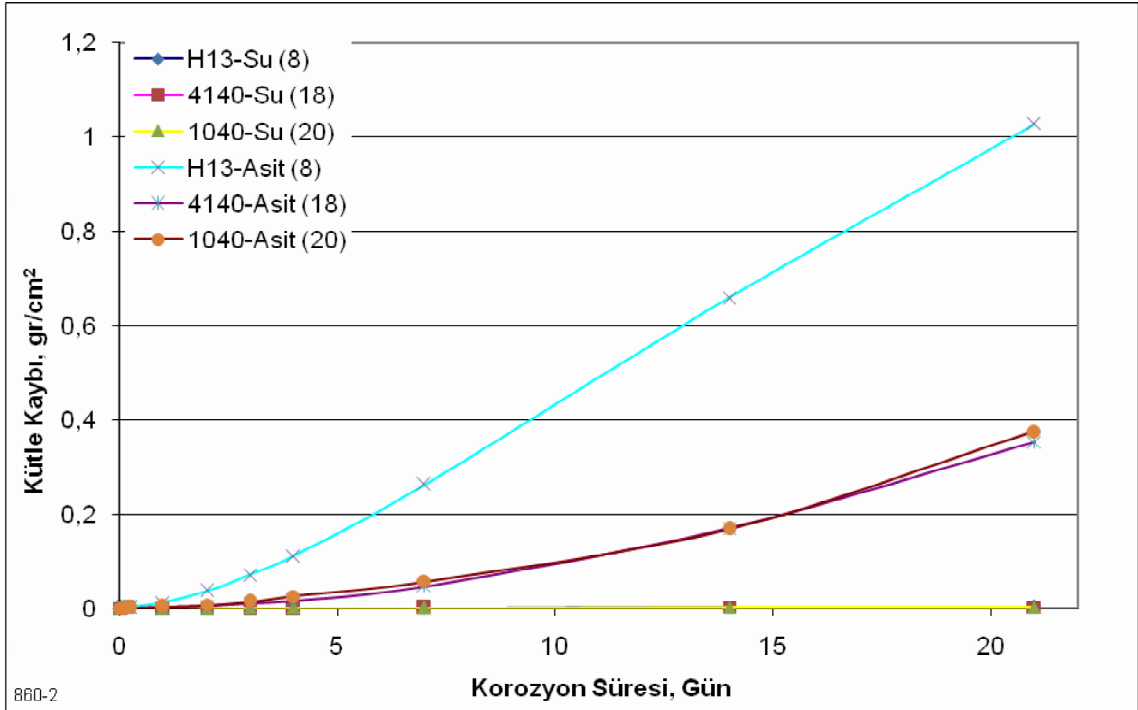
Şekil 7.4.11. AISI 4140 çeliğinin a) su b) asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.



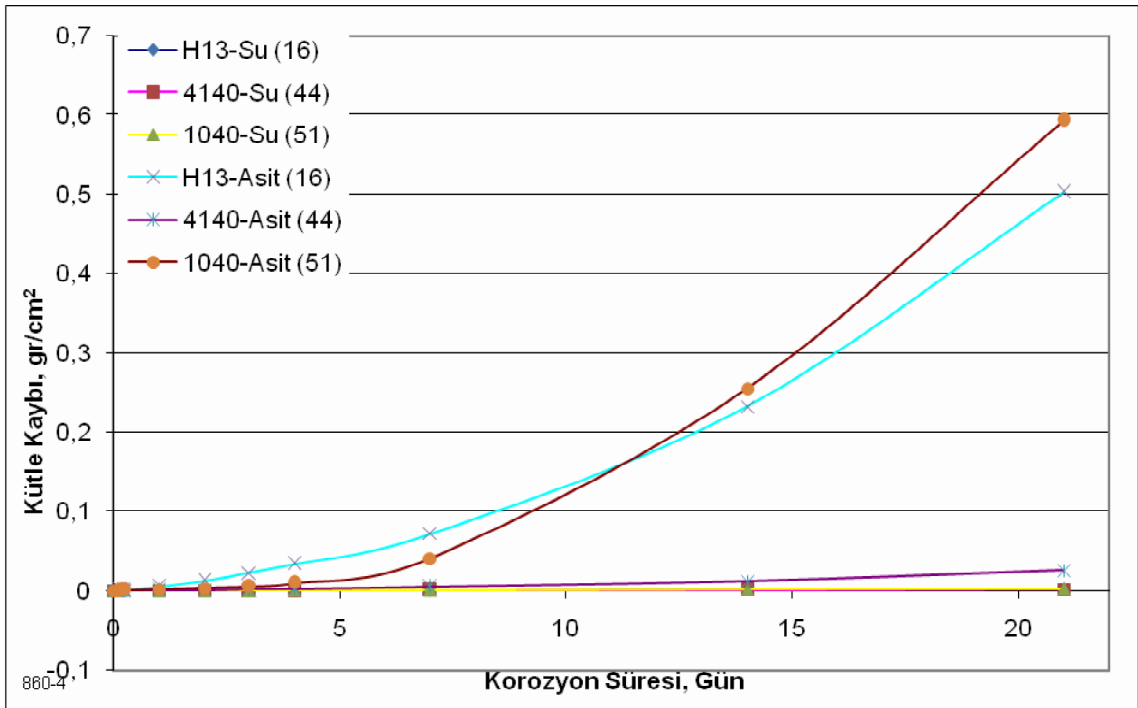
Şekil 7.4.12. AISI H13 çeliğinin a) su b) asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.



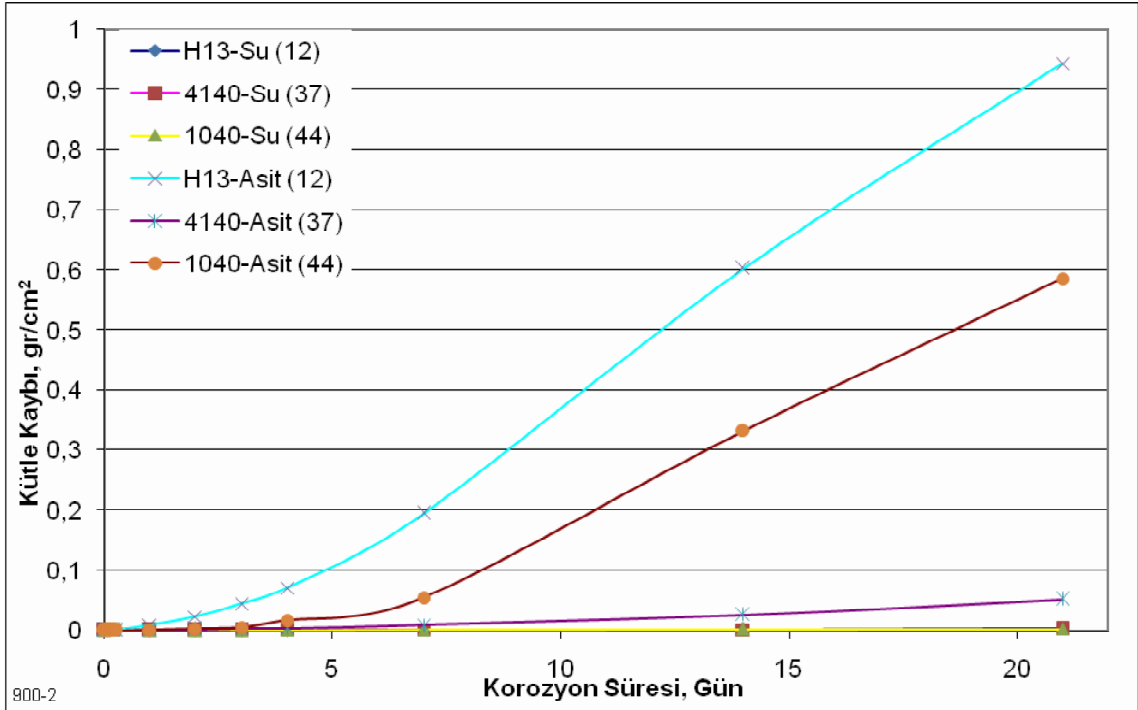
Şekil 7.4.13. Borlanmamış çeliklerde su ve asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.



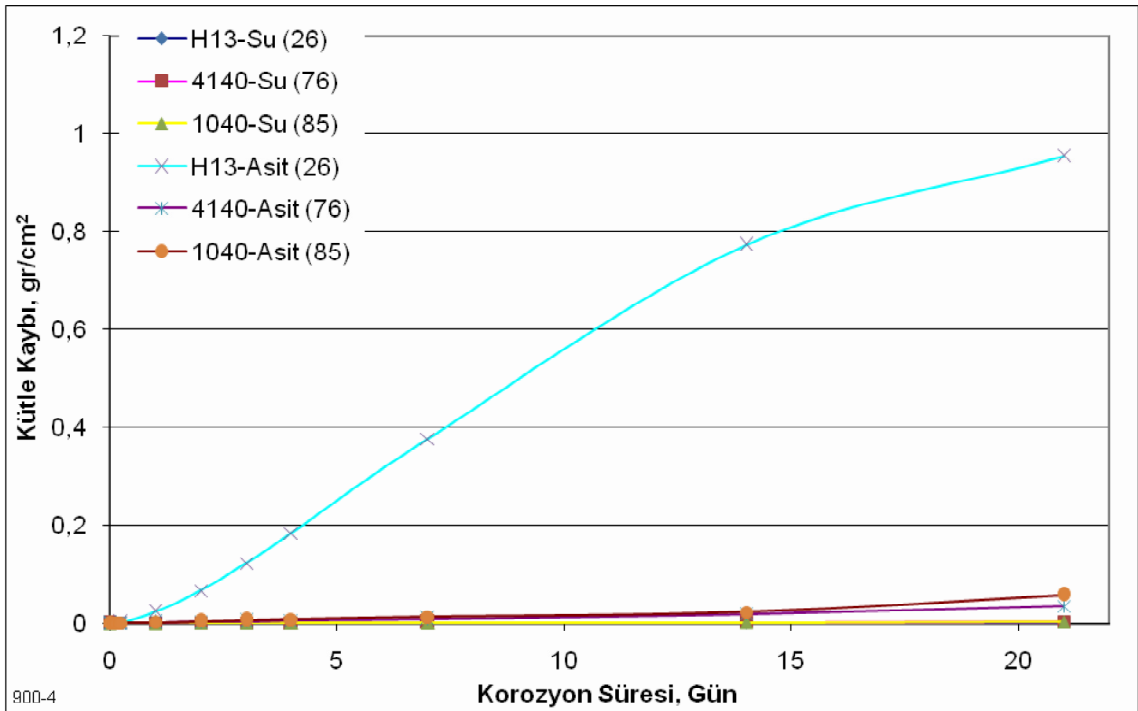
Şekil 7.4.14. 860 °C sıcaklıkta ve 2 saat boyunca borlanmış çeliklerde su ve asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.



Şekil 7.4.15. 860 °C sıcaklıkta ve 4 saat boyunca borlanmış çeliklerde su ve asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.



Şekil 7.4.16. 900 °C sıcaklıkta ve 2 saat boyunca borlanmış çeliklerde su ve asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.



Şekil 7.4.17. 900 °C sıcaklıkta ve 4 saat boyunca borlanmış çeliklerde su ve asit ortamında gerçekleştirilen korozyon deneyi süresince meydana gelen kütle kaybı.

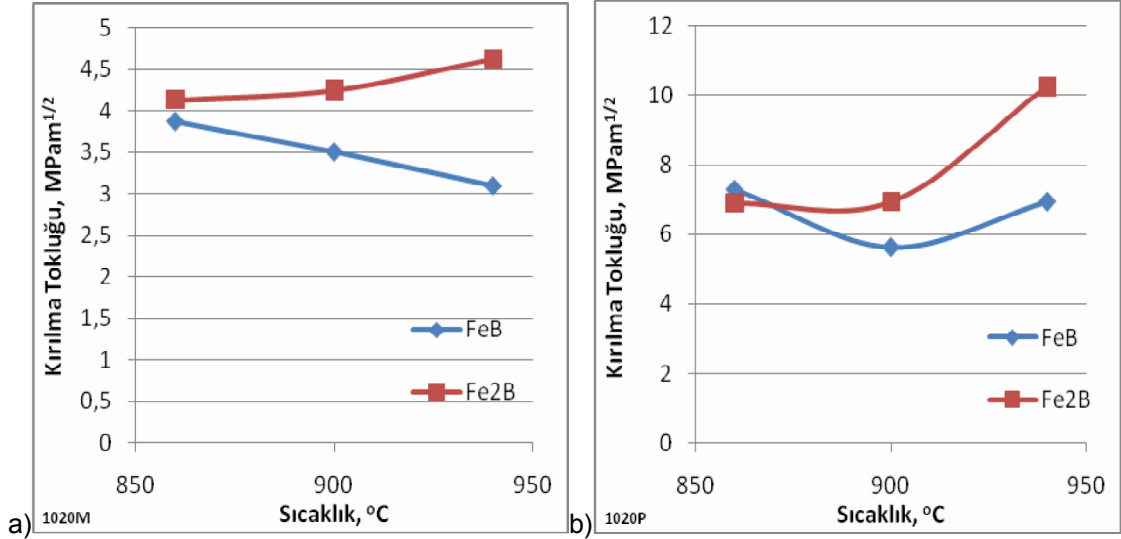
7.5. Kırılma Tokluğu

Borür tabakası üzerinde Vickers uç ile oluşturulan izin yarım köşegen boyu (a) ve çatlak uzunluğu (l) Tablo 7.5.1 'de görülmektedir. Ayrıca tabloda c/a oranı da verilmiştir. Bu sayede çatlak tipleri belirlenebilmektedir. Çalışmamızda orana dikkat edilmeden sonuçlar iki tip çatlak denklemlerine uygulanmıştır. Elde edilen kırılma toklukları Şekil 7.5.1 - 7.5.6. 'da gösterilmiştir.

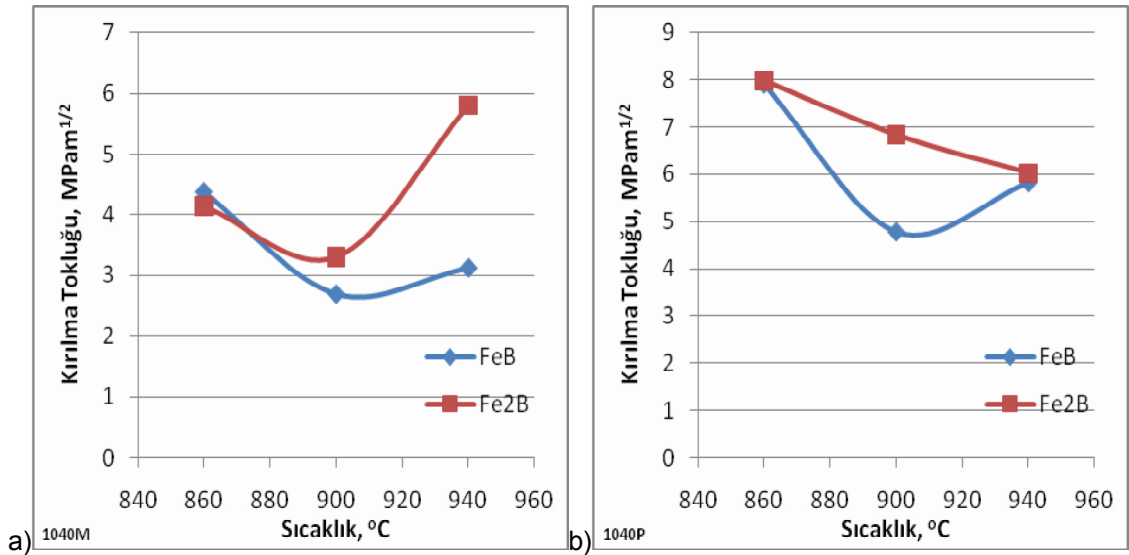
Tablo 7.5. 1. Kırılma tokluğu hesabı için ölçülen değerler.

Çelik (AISI)	Sıcaklık (°C)	Borür Fazı	a (µm)	l (µm)	c (µm)	c/a	Yük (N)
1020	860	Fe2B	9,978	9,706	19,684	1,97	2,94
1020	900	Fe2B	10,58	9,47	20,05	1,90	2,94
1020	940	Fe2B	14,37	10,42	24,79	1,73	4,9
1020	860	FeB	5,467	3,59	9,057	1,66	0,98
1020	900	FeB	5,08	4,81	9,89	1,95	0,98
1020	940	FeB	9,725	12,279	22,004	2,26	2,94
1040	860	Fe2B	10,45	8,74	19,19	1,84	2,94
1040	900	Fe2B	10,22	11,86	22,08	2,16	2,94
1040	940	Fe2B	13,789	12,71	26,499	1,92	4,9
1040	860	FeB	5,543	2,958	8,501	1,53	0,98
1040	900	FeB	5,028	6,702	11,73	2,33	0,98
1040	940	FeB	5,35	5,212	10,562	1,97	0,98
4140	860	Fe2B	5,5755	6,84	12,4155	2,23	0,98
4140	900	Fe2B	10,09	11,07	21,16	2,10	2,94
4140	940	Fe2B	14,31	8,728	23,038	1,61	4,9
4140	860	FeB	3,259	6,7785	10,0375	3,08	0,49
4140	900	FeB	4,96	7,036	11,996	2,42	0,98
4140	940	FeB	9,337	9,8405	19,1775	2,05	2,94
H13	860	Fe2B	4,6998	3,594	8,2938	1,76	0,49
H13	900	Fe2B	4,89	7,775	12,665	2,59	0,98
H13	940	Fe2B	9,395	6,669	16,064	1,71	2,94
H13	860	FeB					
H13	900	FeB					
H13	940	FeB	4,79	5,814	10,604	2,21	0,98

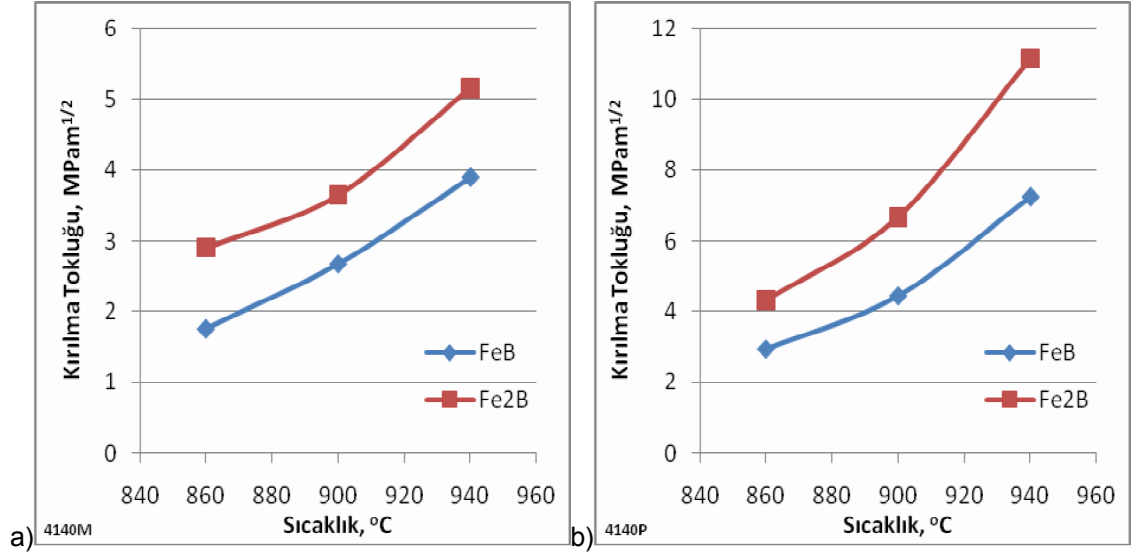
Grafikler incelendiğinde genel olarak FeB tabakasının Fe₂B tabakasından daha düşük bir kırılma tokluğuna sahip olduğunu görüyoruz. Çelikler ile kırılma toklukları arasında bir ilişki olduğunu söylemek zordur. Çünkü çatlak gelişimi borür fazları üzerinde sağlıklı oluşturulamamıştır. Borür fazlarındaki gözenekler, farklı bileşikler vb. çatlak gelişimini engelleyici ya da iletici rol oynamıştır.



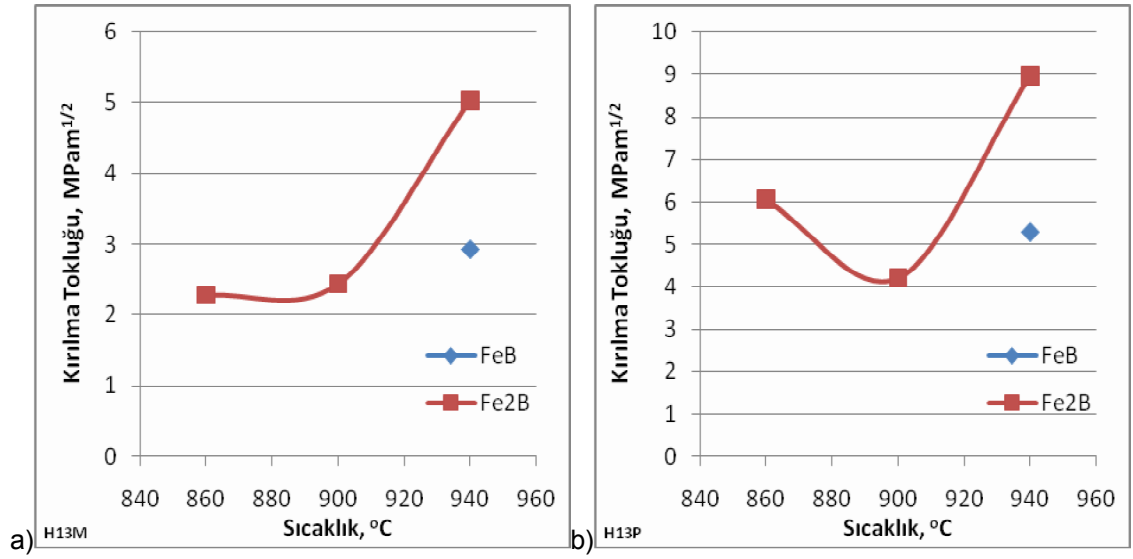
Şekil 7.5.1 . 8 saat süreyle borlanan AISI 1020 çeliğinin a) Medyan tip çatlakla göre b) Palmqvist tip çatlakla göre hesaplanan kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



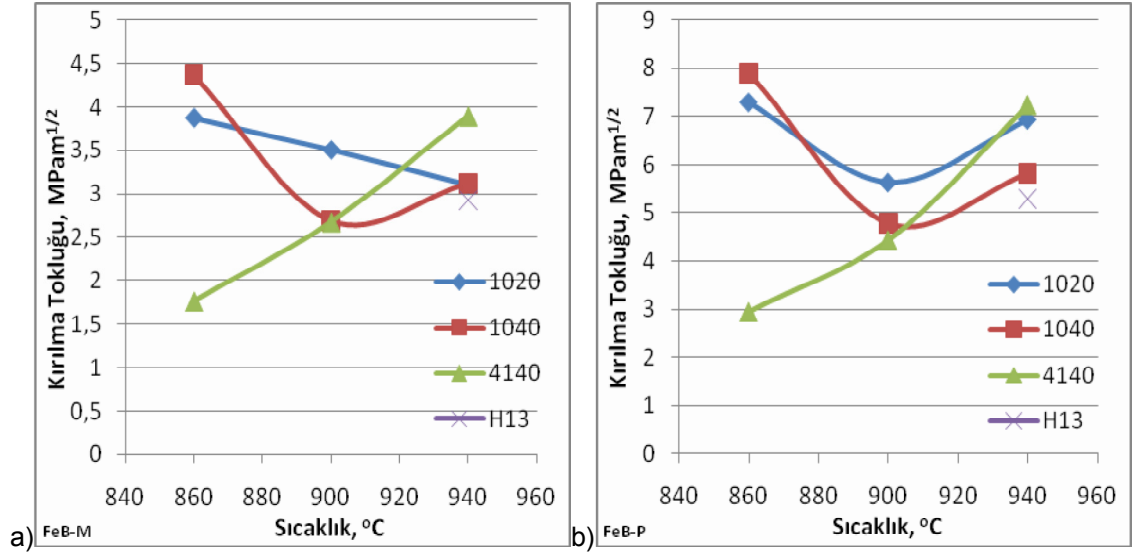
Şekil 7.5.2 . 8 saat süreyle borlanan AISI 1040 çeliğinin a) Medyan tip çatlakla göre b) Palmqvist tip çatlakla göre hesaplanan kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



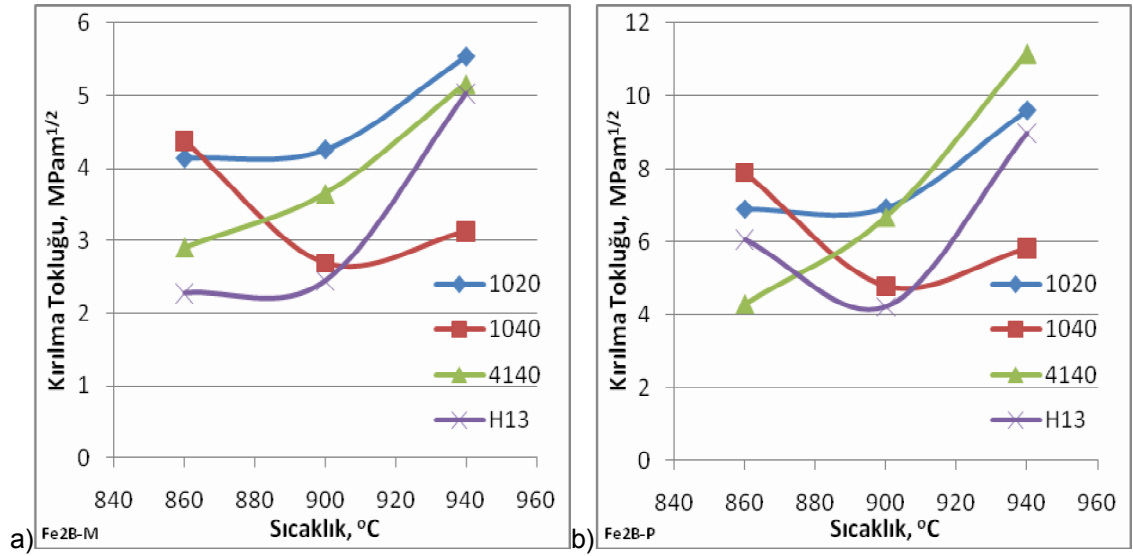
Şekil 7.5.3 . 8 saat süreyle borlanan AISI 4140 çeliğinin a) Medyan tip çatlakla göre b) Palmqvist tip çatlakla göre hesaplanan kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



Şekil 7.5.4 . 8 saat süreyle borlanan AISI H13 çeliğinin a) Medyan tip çatlakla göre b) Palmqvist tip çatlakla göre hesaplanan kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



Şekil 7.5.5 . 8 saat süreyle borlanan çeliklerdeki borür fazı FeB 'nin a) Medyan tip çatlğa göre b) Palmqvist tip çatlğa göre hesaplanan kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



Şekil 7.5.6 . 8 saat süreyle borlanan çeliklerdeki borür fazı Fe₂B 'nin a) Medyan tip çatlğa göre b) Palmqvist tip çatlğa göre hesaplanan kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kullanılan tüm malzemeler için, borlama sıcaklığı ve borlama süresi arttıkça borlama tabakası kalınlığı artmıştır. Tabakanın artışı artan süreyle parabolik olarak değişmiştir.

En yüksek tabaka kalınlığı 1020 malzemesinin 940°C 8 saat borlanarak, en düşük tabaka kalınlığı ise H13 malzemesi 820°C 2 saat borlanarak elde edilmiştir.

1020, 1040 ve 4140 malzemelerinin borlanması sonucu oluşan borlama tabakaları kolonsal yapıda gelişmiştir. Fakat H13 malzemesinde oluşan borlama tabakasındaki kolonsallık daha düşüktür.

Genel olarak C oranının artması B difüzyonunu zorlaştığı için yüksek C içeren çeliklerde daha düşük borür tabakaları elde edilmiştir.

Alaşım elementleri de borür tabakası gelişimini zorlaştırmışlardır. Aynı C oranına sahip AISI 1040 ve AISI 4140 çeliklerinde alaşım AISI 4140 çeliğinde daha düşük tabaka kalınlıkları elde edilmiştir.

Alaşım elementi miktarı artışı borür tabakası gelişimini, dolayısıyla B difüzyonunu zorlaştırmıştır. En düşük tabaka kalınlıkları yüksek alaşım H13 çeliğinde elde edilmiştir.

FeB tabakası daha fazla bor içerdiği için Fe₂B tabakasından daha serttir.

Sertlik derinliği en az AISI H13 çeliğinde elde edilmektedir. Yüksek miktarda alaşım elementi içermesinin etkisiyle ince borür tabakaları oluşmaktadır.

Çeliklere uygulanan borlama işlemiyle elde edilen yüzeydeki borür tabakasının korozyona karşı dayanımı yüksektir. Borlanmış çelikler, borlanmamış çeliklerle kıyas edildiğinde korozyon dayanımının arttığı görülmektedir.

Korozyona maruz kalan borlu yüzeyin uzun süreli dayanması, borür tabakasının kalınlığına ve borür tabakası yüzeyindeki çatlaklara bağlıdır.

FeB tabakasının kırılma tokluğu, Fe₂B tabakasının kırılma tokluğuna göre daha azdır.

İndantasyon yöntemi ile kırılma tokluğu hesaplanırken, çatlak gelişimini düzenli sağlayacak kalınlıkta tabakalar elde edilmelidir. Aksi takdirde çatlaklar tabakalar arasında geçiş yapabilir ya da yüzeye kadar ilerleyebilmektedir.

Ayrıca bu yöntemle elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir düzeyde değildir. Çünkü çatlakların ilerlemesini sınırlayan faktörler (farklı fazlar, gözenekler vb.) çok fazladır. Bu sebeple sıcaklık süre ile karşılaştırmak doğru olmayacaktır.

KAYNAKLAR

- Acarkan N., Bor ürün çeşitleri ve kullanım alanları, 1. Bor Sempozyumu, Kütahya,2002.
- Allaoui O., Bouaouadja N., Sainderman G., Characterization of boronized layers on XC38 steel, Surface and coating technology, 201, 3475-3482, 2006.
- Arios C.T., Coelho A. A., Batista W. W., ISE and fracture toughness evaluation by Vickers hardness testing of an Al₂Nb- Nb₂Al- AlNbNi in situ composite, Alloys and compounds, 472, 2009.
- ASM Handbook Komitesi, ASM Handbook, Volume 4, Heat Treating.1991.
- Ayter T.,Borlama işleminin çeliklerin yüzey kalitesi ve aşınma davranışına etkisinin incelenmesi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri, Yüksek Lisans Tezi, 2005.
- Barış M., Farklı Borlama Sürelerinin Transmisyon Çeliğinde Abrasiv Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- Barsoum M. W., Fundamentals of Ceramics, McGraw-Hill Companies,1996.
- Baştürk S. ve Erten M. Borlama ile yüzey sertleştirme çalışmaları, Mühendis ve Makine Cilt : 47 Sayı: 563, 2006.
- Bayça, S.U. ve Sahin, S., Borlama, Mühendis ve Makina, Sayı 532, C:45, s.51-59., 2004.
- Beatty Richard, Boron (The Elements), Newyork, p 4, 2006.
- Béjar M.A., Moreno E., Abrasive wear resistance of boronized carbon and low- alloy steels, Journal of Materials Processing Technology, 173, 352-358, 2006.
- Bindal, C., Üçışık, A.H., Characterization of borides formed on impurity-controlled chromium-based low alloy steels, Surface Coating Tech, 122, 208-213,1999.
- Buytoz S., Somunkıran İ., Borla kaplanan yüzeyin mikroyapı ve mekaniksel özellikleri, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi,4, 41-5, 2005.
- Campos I., M. Farah, N.Lopez, G.Bermudez, G.Rodriguez, C. VillaVelazquez, Evaluation of the tool life and fracture toughness of cutting tools boronized by the paste boriding process, Applied Surface Science, 254, 10, 2967-2974, 2008.
- Campos I., Palomar M. , Amador A., Ganem R. , Martinez J., Evaluation of the corrosion resistance of iron boride coatings obtained by paste boriding process, Surface & Coatings Technology, vol. 201, pp 2438–2442. 2006.

Campos I., Palomar-Pardave M., Amador A., VillaVelázquez C., Hadad J., Corrosion behavior of boride layers evaluated by the EIS technique, Applied Surface Science, vol. 253, pp 9061–9066. 2007.

Campos I., Palomar-Pardave M., Amador A., VillaVelázquez C., Hadad J., Corrosion behavior of boride layers evaluated by EIS technique, Applied Surface Science, 253, 9061-9066, 2007.

Campos I., Ramírez G., VillaVelázquez C., Figueroa U., Rodríguez G., Study of microcracks morphology produced by Vickers indentation on AISI 1045 borided steels, Materials Science and Engineering, 475, 285-292, 2008.

Campos I., Roses R., Figueroa U., “ Fracture toughness evaluation using Palmqvist crack model on AISI 1045 borided steels, Mate. Science and Engineering, A488, 561-568, 2008.

Culha O., Toparli M, Sahin S., Aksoy T., Characterization and determination of FexB layers' mechanical properties, Materials Processing Technology, 206, 231-240, 2008.

Çalık A., Delikanlı K., Uzun H.A., Ç1040 çeliğinin borlanmasıda oluşan borür tabakasının özelliklerinin incelenmesi, 1. Bor Sempozyumu, 2002.

D. Munz ve T. Fett, Ceramics, Springer, 1999.

Demirci A. H., Mühendislik Malzemeleri, Aktüel yayınları, 2004.

Ersöz A., Arısoy C. F., Başman G., Şeşen M. K., AISI 4140 makine yapım çeliğinin elektrokimyasal borlama ile mekanik ve korozyon özelliklerinin geliştirilmesi, 12. Uluslar arası Malzeme Sempozyumu, 2008.

Karakan M., Alsaran A., Çelik A., Plazma Borlama, Mühendis ve Makine, cilt:43, sayı: 512, Eylül 2002.

Keryvin V, Hoang V. H., Shen J., Hardness, toughness, brittleness and cracking systems in an iron-based bulk metallic glass by indentation, Intermetallics, 17, 211-217, 2009.

Komisyon, Bor Raporu, Tmmob Metalurji Mühendisleri Odası, 2003.

Kubaschewski O., Fe–B, Iron–Boron., volume Iron-Binary phase diagrams, Springer-Verlag, 1982.

Matuschka A.G., Boronizing, C. Hanser, München, 1980

Meriç C., Şahin S. and Yılmaz S.S. , Investigation of the effect on boride layer of powder particle size used in boronizing with solid boron-yielding substances, Materials Research Bulletin, 35, pp. 2165–2172, 2000.

Meriç C., Şahin S., Yılmaz S. S., Katı Borlamada kullanılan tozların tane boyutunun borür tabakasına etkisinin incelenmesi, Makina-İmalat Sempozyumu, 1999.

Nair F., Koruyucu gaz atmosferinde macun borlama tekniği ile elik yüzeylerinin sertleştirilmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen bilimleri, Yüksek Lisans Tezi, 1996.

Palombarini G. and Carbucicchio M., Growth of boride coating on iron, J Mater Sci Lett, 6, pp. 415–416, 1987.

Rios C. T., Coelho A. A., Batista W. W., G Vonalves M. C., Caram R., ISE and fracture toughness evaluation by Vickers hardness testing of an Al₃Nb-Nb₂Al-AlNbNi in situ composite, Alloys and Compounds, 472, 65-70, 2009.

Selçuk B., Yüksek S., Uysal ., Demir esaslı makine elemanlarının aşınma ve korozyon direncinin arttırılmasında borun rol, 1. Bor Sempozyumu, Kütahya, 2002.

Selçuk B., Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 eliklerinin Srtnme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Erciyes . Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1994.

şahin S., Effects of boronizing process on the surface roughness and dimensions of AISI 1020, AISI 1040, and AISI 2714, Materials Processing Technology, 209, 1736-1741, 2009.

şahin S., Katı Borlama Yöntemi ile Ferrobör retimi ve zelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Manisa, 1999.

şahin, S., Effects Of Boronizing Process On The Surface Roughness And Dimensions Of Aısı 1020, Aısı 1040 And Aısı 2714, Journal Of Materials Processing Technology, Vol 208, 1736-1741, 2009.

şimşek M., İçten yanmalı motorlarda borlama ile mukavemet özelliklerinin incelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 2005.

Uluköy A., 21NiCrMo₂ (AISI 8620) eliğinden Yapılmış Dişli arklara Karbürleme ile Beraber Borlama İşleminin Uygulanması, Yüksek lisans Tezi, 2005.

Uzun H. A., Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları, Süleyman Demiral, Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2002.

Yapar U.; Başman G.; Arısoy C.F.; şeşen M.K.; eliklerde Borlama Yoluyla Yüzey Sertleştirme; Metal Dünyası Dergisi, Sayı 115; Syf 69 – 74, 2002.

Yıldızlı K., Borlamanın eliklerde eroziv aşınma davranışına olan etkilerinin deneysel olarak incelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen bilimleri, Yüksek Lisans Tezi, 2002.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Filiz TAŞTAN

Doğum Tarihi-Yeri: 26.05.1985 / İzmir

Medeni Hali: Bekâr

Eğitim:

Lise: 1999-2003, Mustafa Kemal Lisesi (Yabancı dil ağırlıklı)

Üniversite: 2003-2007, Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil: İngilizce (orta seviye)

İş Deneyimi:

Ekim 2007- Kasım 2009, Tübitak Projesi Yardımcı Personel.