

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

SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİ TEL ÇEKME ÇENELERİNİN
AŞINMA DİRENÇLERİNİN TERMOKİMYASAL
BORLAMA YÖNTEMİYLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Tezi Hazırlayan
İbrahim KARAARSLAN

Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Serkan DAL

Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

ARALIK 2023
NEVŞEHİR

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

**SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİ TEL ÇEKME ÇENELERİNİN
AŞINMA DİRENÇLERİNİN TERMOKİMYASAL
BORLAMA YÖNTEMİYLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Tezi Hazırlayan
İbrahim KARAARSLAN**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Serkan DAL**

**Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

ARALIK 2023

Dr. Öğretim Üyesi Serkan DAL danışmanlığında İbrahim KARAARSLAN tarafından hazırlanan "**Soğuk İş Takım Çeliği Tel Çekme Çenelerinin Aşınma Dirençlerinin Termokimyasal Borlama Yöntemiyle İyileştirilmesi**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

.../.../20..

JÜRİ

Başkan : Prof. Dr. Bülent KURT

Üye : Doç. Dr. Ali GÜNEN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Serkan DAL

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun.....tarih ve..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.../.../20..

Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİM SAYFASI

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

İbrahim KARAARSLAN



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam boyunca bana vermiş olduğu katkılarından ve her türlü desteğinden dolayı tez danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Serkan DAL'a, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Bülent KURT'a ve İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Ali GÜNEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Meslek hayatıma başladığım günden itibaren beni her koşulda destekleyen , hayata ve mesleğime dair edindiğim bilgi ve tecrübelerin çoğunu öğrenmemi sağlayan , yapılan çalışmalarında yardımcı olan Demiryaka Holding'e Hasçelik ve Halat San. Ailesine ,

Hayatım boyunca maddi manevi destekleriyle her zaman yanımda olan çok değerli babaannem Hatice KARAARSLAN, annem Ayşe KARAARSLAN, babam Ahmet KARAARSLAN, kardeşlerim Arif KARAARSLAN, Eda Nur KARAARSLAN, eşim Şerife KARAARSLAN, kızlarım Ayşe İkra KARAARSLAN ve Almıla KARAARSLAN 'a içtenlikle teşekkür ediyorum ve bu yüksek lisans tezini çok kıymetli aileme ithaf ediyorum.

SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİ TEL ÇEKME ÇENELERİNİN AŞINMA DİRENÇLERİNİN TERMOKİMYASAL BORLAMA YÖNTEMİYLE İYİLEŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

İbrahim KARAARSLAN

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

Aralık 2023

ÖZET

Bu çalışmada soğuk iş takım çeliği tel çekme çenelerinin termokimyasal borlama yöntemiyle borlanabilirliği araştırılmıştır. Araştırmanın amacı kısa süre içerisinde aşınan ve kullanılamaz hale gelen tel çekme çenelerinin borlama işlemiyle yüzey sertliği ve aşınma direnci özelliklerinin iyileştirilerek kullanım ömrünün arttırılmasıdır. Bu amaçla tel çekme çenesi örnekleri farklı sıcaklıklarda (900 °C, 950 °C ve 1000 °C) ve 6 saat süreyle borlanmıştır. Borlanan örneklerin kaplama kesitlerinin incelenebilmesi için metalografik olarak hazırlanmıştır. Elde edilen kaplama tabakalarının mikroyapısal incelemeleri, kaplama tabakası kalınlıkları, kaplamaların elementel dağılımı ve faz yapısı, optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım spektrometresi (EDS), X-Işını Difraksiyonu (XRD) ile belirlenmiştir. Mikrosertlik, kırılma tokluğu ve aşınma dayanımı değerlerinin belirlenmesi amacıyla mikrosertlik ve aşınma testleri uygulanmıştır. Sonuç olarak homojen ve FeB ve Fe₂B'den oluşan iki katmanlı bir kaplama tabakasının elde edildiği görülmüştür. Kapla sıcaklıklarının artışlarıyla kaplama kalınlıklarının artmakta olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında örneklerin dışli yüzeylerinde düz yüzeylere oranla daha kalın kaplamalar elde edilmiştir. Altlık malzemeye göre kaplamaların mikrosertliklerinin 5-6 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Kırılma tokluğu değerleri kaplama sıcaklığının artmasıyla bir miktar artmış olsa da büyük bir fark görülmemiştir. Aşınma testleri sonucunda aşınma oranlarının kaplanmış örneklerde yaklaşık 4 kat azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Borlama , Tel Çekme , Soğuk İş Takım Çelikleri

Tez Danışmanı: Dr.Öğr.Üyesi Serkan DAL

Sayfa Adedi: 52

**IMPROVEMENT OF THE WEAR RESISTANCE OF COLD WORK TOOL
STEEL WIRE DRAWING JAWS USING THE THERMOCHEMICAL
BORIDING METHOD**

(Master Thesis)

İbrahim KARAARSLAN

NEVSEHIR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCES

December 2023

ABSTRACT

In this study, the boridability of cold work tool steel wire drawing jaws was investigated by thermochemical boriding method. The aim of the research is to increase the lifespan of wire drawing jaws, which wear out and become unusable in a short time, by improving the surface hardness and wear resistance properties by boriding. For this purpose, wire drawing jaw samples were boronized at different temperatures (900 °C, 950 °C and 1000 °C) for 6 hours. It was prepared metallographically to examine the coating sections of the borided samples. Microstructural examinations of the obtained coating layers, coating layer thicknesses, elemental distribution and phase structure of the coatings were determined by optical microscope, scanning electron microscope (SEM), energy dispersion spectrometry (EDS), and X-Ray Diffraction (XRD). Microhardness and wear tests were applied to determine microhardness, fracture toughness and wear resistance values. As a result, it was observed that a homogeneous two-layer coating layer consisting of FeB and Fe₂B was obtained. It has been observed that coating thicknesses increase with increasing coating temperatures. In addition, thicker coatings were obtained on the gear surfaces of the samples compared to the flat surfaces. It was determined that the microhardness of the coatings was 5-6 times higher than the substrate material. Although the fracture toughness values increased slightly with increasing coating temperature, no significant difference was observed. As a result of the wear tests, it was observed that the wear rates decreased approximately 4 times in the coated samples.

Keywords: Boriding , wire drawing , cold work tool steel

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Serkan DAL

Number of Pages:52

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLOLAR LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xi
1. BÖLÜM	
GİRİŞ	1
1.1.Çalışmanın Amacı.....	1
2. BÖLÜM	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1.Tel Çekme	4
2.2.Takım Çelikleri	5
2.2.1.Soğuk iş takım çelikleri.....	6
2.3. Borlama	7
2.3.1.Borür tabakanın yapısı	8
2.3.2.Borlamanın avantajları.....	10
2.3.3.Borlama işleminin dezavantajları.....	11
2.3.4. Borlama yöntemleri.....	11
2.3.5.Borlama işleminin endüstride uygulama alanları.....	15

2.4.Borlama Kinetiği.....	16
2.5.Difüzyon Mekanizması	17
3. BÖLÜM	
MATERYAL VE YÖNTEMLER	19
3.1.Materyal	19
3.2 Yöntem.....	20
3.2.1 Kaplama yöntemi	20
3.2.2 Metalografik numune hazırlama	20
3.2.3 Optik mikroskop incelemesi	21
3.2.4. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), EDS (Enerji Yayılımlı X-Işını Analizi) analizleri.....	22
3.2.5. Mikrosertlik ve kırılma tokluğu incelemesi.....	22
3.2.6 XRD (X-Işını Difraksiyonu) analizi	23
3.2.7. Aşınma testi.....	24
4. BÖLÜM	
BULGULAR.....	26
4.1 Optik mikroskop, SEM ve EDS incelemeleri	26
4.2. XRD Analiz Sonuçları	32
4.3. Kaplama Kalınlıkları.....	33
4.4. Mikrosertlik ve Kırılma Tokluğu Sonuçları.....	37
4.5.Aşınma Testi Sonuçları	38
5. BÖLÜM	
TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER.....	47
KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	53

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Şekil Borlanmış çeliklerin sertliklerinin diğer işlem görmüş malzemelerle karşılaştırılması	11
Tablo 2.2 Sıvı borlama yönteminde kullanılan bazı bor kaynakları	14
Tablo 2.3 Borlama işlemiyle elde edilen ürünlerin kullanım alanları	16
Tablo 3.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan X210Cr12 (AISI D3) soğuk iş takım çeliği kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)	19
Tablo 4.1 Borlanan örneklerin yüzeylerinden elde edilen XRD verileri kullanılarak hesaplanan ortalama kristalit boyutu (D), diskolasyon yoğunluğu (δ) ve mikrogerinim (ϵ) değerleri.	33
Tablo 4.2. Örneklerin borlama sonucu elde edilen kaplama kalınlıkları	35
Tablo 4.3. Örneklerin borlama sonucu elde edilen kaplama kalınlıkları	38
Tablo 4.4. Örneklerden elde edilen aşınma testi sonuçları	46

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Tel Çekme Prensibi ve haddenin şekli	5
Şekil 2.2. Borür tabakası çeşitleri	9
Şekil 2.3. Borür Tabakaları İle Geçiş Bölgesi Temsili	10
Şekil 2.4.Katı Borlama İşleminin Şematik Gösterimi	13
Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan X210Cr12 soğuk iş takım çeliği çekirme çenesi.....	19
Şekil 3.2 Termokimyasal yöntem ile borlama işlemi süreci.....	20
Şekil.3.3 Numune hazırlamada kullanılan Hassas kesme, kalıplama, zımparalama ve parlatma cihazları.....	21
Şekil 3.4 Çalışmada kullanılan optik mikroskop ve görüntü analiz sistemi	21
Şekil 3.5 Tescan MAIA3 XMU Elektron mikroskobu ve EDS dedektörü.....	22
Şekil 3.6 Future Tech FM-700 mikrosertlik cihazı (a), mikrosertlik izi köşelerinden gelişen çatlak uzunlukları (b).....	23
Şekil 3.7. Rigaku Smartlabtm X-Işını Diffraktometresi	24
Şekil 3.8. 15N yük altında aşınma testi yapılmış örneklerin makro yüzey fotoğrafları..	25
Şekil 4.1 İşlemsiz (a) 900 °C (b), 950 °C (c) ve 1000 °C (d) sıcaklıklarda 4 saat süreyle borlanan tel çekme çenelerinin Optik mikroyapı fotoğrafları.....	27
Şekil 4.2. 900 °C (a), 950 °C (b) ve 1000 °C’de (c) termokimyasal borlama işlemiyle elde edilen kaplama tabakaları SEM fotoğrafları	28
Şekil 4.3. 900 °C’de termokimyasal borlama işlemiyle 4 saat süreyle elde edilen kaplama tabakası çizgisel EDS analizi grafiği	29
Şekil 4.4. 950 °C’de termokimyasal borlama işlemiyle 4 saat süreyle elde edilen kaplama tabakası çizgisel EDS analizi grafiği	30
Şekil 4.5. 1000 °C’de termokimyasal borlama işlemiyle 4 saat süreyle elde edilen kaplama tabakası çizgisel EDS analizi grafiği.....	31
Şekil 4.6 Borlanan örneklerin kaplama yüzeylerinden elde edilen XRD analizi grafiği	32
Şekil 4.7. Dişli ve yan yüzeylerde elde edilen kaplama kalınlığı optik mikroskop fotoğrafı	34

Şekil 4.8. Dişli ve yan yüzeylerde elde edilen kaplama kalınlığı SEM mikroyapı fotoğrafları	36
Şekil 4.9. Borlanmış örnek yüzeylerinden elde edilen mikrosertlik değerleri dağılımı grafiği	37
Şekil 4.10.Örneklerin aşınma izi fotoğrafları işlemsiz (a), 900 °C (b), 950 °C (c), 1000 °C (d).....	39
Şekil 4.11. 500 m kayma mesafesi için 900 °C, 950 °C ve 1000 °C ‘de borlanan ve işlemsiz AISI D2 çekme çenesi örneğinin sürtünme katsayısı davranışı.....	40
Şekil 4.12.İşlemsiz AISI D2 soğuk iş takım çeliği çekme çenesi örneğinden alınan aşınma bandı 3d profilometre analizi	41
Şekil 4.13. 900 °C’de 6 saat süreyle borlanan AISI D2 soğuk iş takım çeliği çekme çenesi örneğinden alınan aşınma bandı 3d profilometre analizi	42
Şekil 4.14. 950 °C’de 6 saat süreyle borlanan AISI D2 soğuk iş takım çeliği çekme çenesi örneğinden alınan aşınma bandı 3d profilometre analizi	43
Şekil 4.15. 1000 °C’de 6 saat süreyle borlanan AISI D2 soğuk iş takım çeliği çekme çenesi örneğinden alınan aşınma bandı 3d profilometre analizi	44
Şekil 4.16. Aşınma sonucu numunelerin EDS analizi sonuçları.....	46

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

°C : Santigrat derece

K: Kelvin

ppm : Milyondabir

gr : Gram

cm³ : Santimetreküp

N/mm² :Newton/milimetrekare

GPa : Gigapascal

MPa : Megapaskal

µm : Mikrometre

B : Bor

C :Karbon

B₄C : Bor karbür

SiC :Silisyum karbür

HV :Vickers sertliği

Na :Sodyum

Cu :Bakır

Al :Alüminyum

Fe :demir

O :oksijen

mm :milimetre

SiC :silisyum karbür

Na₂B₄O₇ :ergimiş boraks

NaBF₄: Sodyum bor tetraflorür

KBF₄: Potasyum bor tetraflorür

FeB : Demir borür bileşiği

Fe₂B :Demir di borür bileşiği

Na₂CO₃ :Sodyum karbonat

B₂H₆: di boran

µm :mikron

g/mol :gram/mol

g/cm³ :gram/santimetre kúp

P :fosfor

N :azot

Mn :mangan

Si :silisyum

S: kúkürt

XRD : X- ışınları difraksiyon analizi

EDS :Enerji Dağılım Spektrometresi

TEM :Transmission Electron Microscope

AISI : Amerikan Çelik Endüstrisi Normu

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu T : Sıcaklık

TRD : Termo Reaktif Difüzyon

YMK :yüzey merkezli kúbik

1.BÖLÜM

GİRİŞ

1.1.Çalışmanın Amacı

Endüstride malzemelerin kullanım yerleri ve koşulları değiştikçe malzemelerden de her anlamda yüksek performanslar beklenmektedir. Yüksek performans beklenen özellikler malzemenin kullanım süresi, verimliliği, yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi, korozyona dayanım, sürtünme katsayısı, yüzey sertliği v.b. olarak sıralanabilir. Ancak aynı anda tüm özelliklerin geliştirilmesi zordur. Bu durumda optimum şartlar sağlanmalı ve aranmalıdır. Malzemelerin kullanım süreleri ve yüzey sertliklerini değiştirmeye ve yükseltmeye yönelik çalışmalar devamlı gündemde olup bu konularda birçok yöntem uygulanmış geliştirilmiş ve tatbik edilmiştir. Bu yöntemlerin bazılarında malzemenin yüzeylerinde bir kimyasal bileşim değişikliği gözlemlenmezken diğer yöntemlerde ise bir kimyasal bileşim değişikliği gözlemlenmektedir. Malzemelerin yüzeylerinde kimyasal bileşim değişimine neden olan uygulamalarda, malzeme yüzeyinde farklı bir tabaka oluşumu söz konusudur [1].

Malzemeler kullanım yerlerinde genellikle aşınma ve korozyon dirençlerinin azlığı sebebiyle oluşan hasarlar nedeniyle malzemelerde kalıcı veya malzeme ömürlerini azaltıcı olumsuzluklar meydana gelmektedir. Bu olumsuzlukların sonucu olarak hammadde kaybı olmakla beraber, parçaların zarar görmesiyle maddi ve manevi kayıplar yaşanmaktadır. Endüstride bu durumlar istenmemekle beraber, verimliliğin artırılması ve sürekliliğin sağlanması için malzeme yüzeylerine çeşitli metodlarla kaplama işlemi uygulanmakta böylece yüzeylerde aşınmaya dayanıklı sert tokluğu yüksek tabakalar elde edilmiş olup, korozyona ve yüksek sıcaklık şartlarına dayanıklı tabakalar oluşturulmuş olacaktır [2].

Çelik tel üretimi tel çekme soğuk deformasyon işlemi ile yapılmaktadır. Tel çekme, filmaşın diye tabir edilen kangalların veya başlangıç çap ölçüleri yüksek metallerin tel çekme makinalarında haddelerden geçirilerek çapını inceltme kesit daralması sağlama ve

böylelikle nihai ürüne mukavemet kazandırma işlemidir. Tel çekme prosesinde teller, makinadaki belirli çaplardaki bloklara sarılarak hadde diye adlandırılan kalıplardan geçirilir ve tel kesiti daraltılarak tele dairesel bir şekil ve ilk ürüne göre mukavemet kazandırılmış olur. Tel çekme prosesinde basma gerilmeleri telin hadde ile temas yüzeyinde ortaya çıkar ve plastik şekil verme sağlar. Yüksek bir yüzey kalitesi, pürüzsüzlüğü ve tel çapında çok dar toleranslarda işlem yapmak için tel çekme prosesi uygundur. Genelde dairesel kesitli ürünler kullanılır [3]. Tel çekme işlemi esnasında telin tel çekme makinasındaki bloklara sarılması ve çektilmesi gerekmektedir. Bu işlemleri yapabilmek için sert, aşınma direnci, korozyon direnci yüksek soğuk iş takım çeliğinden üretilen çektilme çeneleri kullanılmaktadır. Bu çeneler mevcut halleri ile aşınma direnci yüksek soğuk iş takım çeliklerinden imal edilmelerine rağmen çene sarfiyatı fazladır. Bu çalışma ile kullanılan mevcut malzemenin kullanım ömrü arttırılmaya çalışılacak olup, üretim, kalite ve verimlilik arttırılması hedeflenmektedir. Özellikle sürtünme esaslı çalışan makine elemanlarında, bir süre sonra ortaya çıkan aşınma problemlerini azaltmak için, endüstride birçok yüzey iyileştirme teknikleri araştırılmakta denenmekte ve uygulanmaktadır [4].

Tel çekme çenelerine termokimyasal yöntemle borlama işleminin başarılı olması durumunda çenelerin aşınma direnci arttırılacak, sarfiyatlar azalacak, çenelerin hızlı bozulması sebebiyle oluşan hurda azaltılacak, işletme maliyetleri ve işçilik oranı azaltılacaktır. Aynı zamanda bu durum demir-çelik sektöründeki benzer uygulamalarda kullanılan malzemeler için de bir yol açacak ve uygulanabilecektir.

Yapılan çalışmalarda, malzemelerin yüzey özelliklerinin termokimyasal borlama yöntemi ile geliştirilebileceği bulunmuştur. Borlama, termokimyasal bir yüzey sertleştirme ve geliştirme işlemi olup, genel olarak malzeme yüzeyine bor atomlarının emilimi olarak adlandırılabilir. Bor atomları yüksek sıcaklık ortamında ısı enerjisiyle malzeme yüzeyine yayınırlar ve esas metal atomlarıyla birlikte uygun borür tabakaları oluştururlar. Borlama işlemi, günümüze kadar yaygın olarak yüzey sertliği ve aşınma direnci yüksek yüzeyler oluşturmak amacıyla da kullanılmıştır [5]. Borlama işlemi, karbürleme ve nitrürleme gibi diğer yüzey işlemleriyle mukayese edildiğinde daha yüksek sertlik değerlerine (1500-5100 HV) sahip olduğu gözlemlenmektedir. Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayısı ile birlikte çok iyi tribolojik

özelliik sergilerler. Borlanmış çelikler alkali veya seyreltik asit gibi ortamlarda yüksek korozyon ve erozyon direncine sahiptirler. Borlanmış yüzeyler, 750-1050 °C sıcaklıkları arasında oksitlenmeye karşı oldukça yüksek direnç göstermektedirler. Borlanmış çeliklerin oksidasyon ve korozyon ortamlarında yorulma ve servis ömürleri daha yüksektir [6].



2.BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

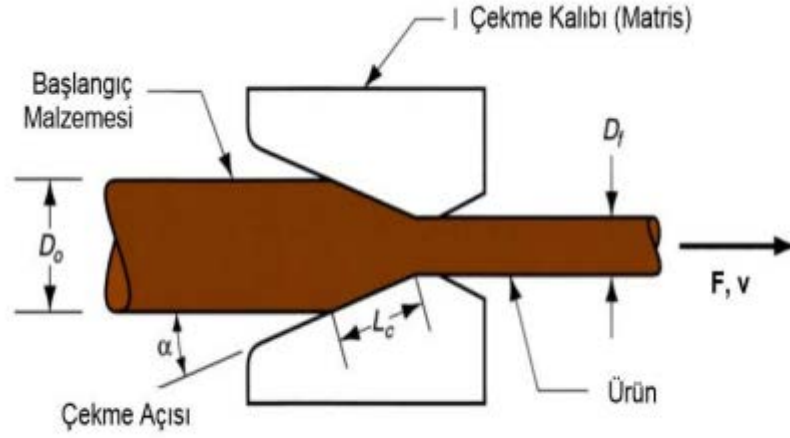
2.1.Tel Çekme

Tel çekme bir soğuk deformasyon işlemi olup filmaşın veya çelik tellerin belirli oranlarda haddelerden geçirilerek istenilen çapa düşürülmesiyle gerçekleşir. Filmaşın ya da çelik tel hadde adı verilen konik şekle sahip kalıplardan geçirilerek nihai ölçüye getirilmesi işlemidir. Bu işlem esnasında telin akma dayanımının üzerine çıkılarak plastik deformasyon sağlanır, kalıcı deformasyon sağlanmış olur [7].

Tel çekme proses kalitesine etki eden birçok parametre bulunmaktadır. Bunları şöyle sıralayabiliriz;

- Kullanılan hammaddenin yüzeyi ve kaplaması
- Kullanılan hammaddenin içyapısı
- Kullanılan hammaddenin kimyasal kompozisyonu
- Tel çekme makinaları ve makine soğutma sistemleri
- Kullanılan haddelerin geometrisi ve boyutları
- Kullanılan yağlayıcılar
- Tel çekme hızı
- Nihai çapa inilene kadar ki haddeler arasındaki redüksiyon oranı

Tel çekme prosesi ile birçok sektörde hammadde ya da yarı mamül olarak kullanılan malzemeler üretilmektedir. Tel çekme prosesi yardımıyla malzemenin şekillendirmesi ve çap küçültmesi yapılabilmektedir. Tel çekme işleminden sonra ortaya çıkan ürünler çoğunlukla halat, endüstriyel yaylık, çivi, somun, cıvata vb. malzemeler için çelik malzemesine yapılırken, iletken ve kablo sektöründe ise bakır ve alüminyum malzemelerle beraber kullanılarak iskelet görevi görmesi için kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. Tel Çekme Prensibi ve haddenin şekli [8]

2.2. Takım Çelikleri

Takım çelikleri, farklı birçok malzemenin şekillendirilmesi, boyutlandırılması, işlem görmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan özel çelik sınıfıdır. Yaygın kullanımları olan takım çeliklerine ısıtma işlemi uygulanması sayesinde yüksek yüzey sertliği elde edilebilmektedir. Yüksek yüzey sertliği elde edilen takım çelikleri böylelikle talaş kaldırma işlemi için kullanılacak kesici uçların üretiminde, sertlik yüksek sıcaklığa dayanım tokluk rijitlik gibi özellikler gerektiren yerlerde kullanılmaktadır. Takım çeliklerinin çeşidinin fazla olması ve kimyasal kompozisyon olarak çok geniş aralıklarda elemental değerlere sahip olması nedeniyle bu çelikler diğer çelik grupları ile yakın kimyasal kompozisyonlara sahip olmasına neden olmaktadır. Bu da takım çeliklerinin kimyasal kompozisyonuna göre sınıflandırılmasını çok zor hale getirmektedir. Takım çeliklerini sınıflarına ayırma işlemi ana kullanım alanlarına göre yapılmaktadır. Kullanım alanına göre yapılan sınıflandırmada, takım çelikleri; sıcak iş takım çelikleri, soğuk iş takım çelikleri, yüksek hız takım çelikleri olarak ayrılmıştır ve 3 ana başlıkta toplanmıştır. Bu çelikleri farklı kılan özellikleri, malzeme özelliklerini etkileyen kullanım sıcaklığı ve malzemenin temperleme sıcaklığıyla sertliğinin değişimidir [8-9] .

2.2.1. Soğuk iş takım çelikleri

İşlem sıcaklığı 200°C'nin altında çalışan iş parçalarının talaşlı ve talaşsız şekil verme(kesme, form verme, sıvama, eğme, bükme vb.) işlemlerinde kullanılır. Sertlik ve aşınma dayanımının yüksek olması ve kolayca bu özellikleri kazanabilmesi, soğuk iş takım çeliklerinin kullanılmak istenmesinin en önemli nedenidir. Bünyesinden bulunan alaşım elementleri ve karbon miktarına bağlı olarak yüksek sertlik, yüksek aşınma dayanımı, yüksek tokluk, sertleşebilirlik gibi özelliklerin kullanım yerine göre istenen değerlerde elde edilmesi mümkündür [10].

Soğuk iş takım çeliklerindeki karbon oranı % 0.30 - %2.50 arasındadır. Soğuk iş takım çeliklerinde alaşım elementi olarak karbon haricinde krom, vanadyum, molibden ve tungsten ile birlikte nikel ve manganda bulunmaktadır [11].

Sertlik özelliğinin gelişmesi uygulanan ısıl işleme ve malzemenin mikroyapısına göre değişmektedir. Sertlik matris yapısından gelebildiği gibi aynı zamanda içyapıdaki kalıntılara da bağlı olabilir. Soğuk iş takım çeliklerinin mikroyapısındaki martenzit, kalıntı östenit, kalıntı miktarı ve bunların dağılımı malzemenin sertliğini etkileyen en önemli parametrelerdir. Soğuk iş takım çelikleri genel olarak; kesme, delme, form verme ve bükme kalıplarında, soğuk ekstrüzyon, haddeleme ve plastik sektöründe makine bıçakları, cıvata perçin ve somunları, kâğıt ve plastik bıçakları vb. makine parçalarının veya sistemlerin imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Soğuk iş takım çelikleri 3 ana gruba ayrılmaktadır;

- Orta Alaşımlı, Havada Sertleşen Soğuk İş Takım Çelikleri
- Yüksek Karbon ve Yüksek Kromlu Soğuk İş Takım Çelikleri
- Yağda Sertleşen Soğuk İş Takım Çelikleri

2.2.1.1. Orta alaşımlı havada sertleşen soğuk iş takım çelikleri

AISI standardında A grubu olarak gösterilen takım çelikleridir. Bu soğuk iş takım çeliği grubu havada sertleşebilme özelliklerine sahiptir. Havada sertleşme ve temperleme işlemleri, şekil verme, çekme ve kesme kalıpları gibi yüksek toklukla birlikte iyi aşınma

direnci elde edilme durumunda tercih edilir. Bu türde yer alan çelikler genel olarak, kesici uçlarda, bıçaklarda, ovalama kalıplarında kullanılmaktadır. Yüksek aşınma dirençleri sayesinde bu çelikler, seramik ve tuğla kalıplarında da tercih edilmektedirler [12].

2.2.1.2. Yüksek karbon ve yüksek kromlu soğuk iş takım çelikleri

AISI standardına göre D grubu olarak tanımlanan takım çelikleridir. Yüksek aşınma dirençleriyle bilinmektedirler. Bu özelliklerinden dolayı soğuk şekil verme özellikleri genel olarak iyidir. Genel olarak kimyasal kompozisyonunda %1,40 ile %2,30 arasında karbon içeren ve %12'ye kadar krom içeren soğuk iş takım çeliğidir. İçerisinde %1 civarında molibden bulunan çeşitleri mevcuttur. Bunların yanı sıra vanadyum ve tungsten gibi alaşımları da içerebilirler. Alaşım elementlerinin artması mekanik özelliklerini arttırmaktadır. Bu çelik türü en yüksek sertlik değerini havada soğutularak kazanmaktadır. Bu sınıftaki soğuk iş takım çelikleri uzun soluklu boşluk çıkarma, şekillendirme, derin çizme ve kesme kalıplarında kullanılmaktadır [13].

2.2.1.3. Yağda sertleşen soğuk iş takım çelikleri

AISI standardına göre O grubu olarak tanımlanan takım çelikleridir. Östenitleme sıcaklık bölgesinden oda sıcaklığı bölgesine kadar, yağda soğutmayla maksimum sertliğin elde edildiği alaşımlandırılmış soğuk iş takım çelikleri sınıfıdır. Üç tip soğuk iş takım çeliği grubu da yapısında serbest halde kalacak kadar karbon alaşım elementi içermektedir. Bu takım çeliklerinde karbon miktarının artmasıyla doğru orantılı yüksek aşınma dirençlerine ulaşılmaktadır. Bu takım çelikleri kesme çekme ve şekillendirme kalıplarında kullanılmaktadır. İçerisinde bulunan karbon miktarı % 0.9 - % 1.5 oranındadır. Ayrıca mangan, krom ve tungsten de bulunmaktadır [13].

2.3. Borlama

Borlama, bor atomlarının malzemenin yüzeyine difüzyon yoluyla emilmesi sağlanarak malzeme yüzeyinden başlayarak ortam şartlarına göre belirli derinliklere nüfuz ederek yüzey özelliklerinin güçlendirilmesi işlemidir. termokimyasal bir yüzey işlemi olan borlama yüksek sıcaklık koşullarında ve belirli sürelerde yapılmalıdır. Bu proses metal

malzemelerin yüzeyinde korozyon direnci, aşınma direnci ve sertlik özelliklerini yükselterek kullanıldıkları yerde bu iyileşen özelliklerden fayda sağlama esasına dayanmaktadır. Genel olarak borlama işlemi uygun ortam ve koşullar sağlanarak, 1-12 saat süreyle ve 750-1050 °C sıcaklıklarda yapılmaktadır. Borlama işlemi genellikle demir esaslı alaşımlara uygulanmaktadır. Haricen takım çelikleri, demir dışı metal ve alaşımları, paslanmaz çelikler, dökme demirler gibi malzemelere de uygulanabilmektedir [14-16].

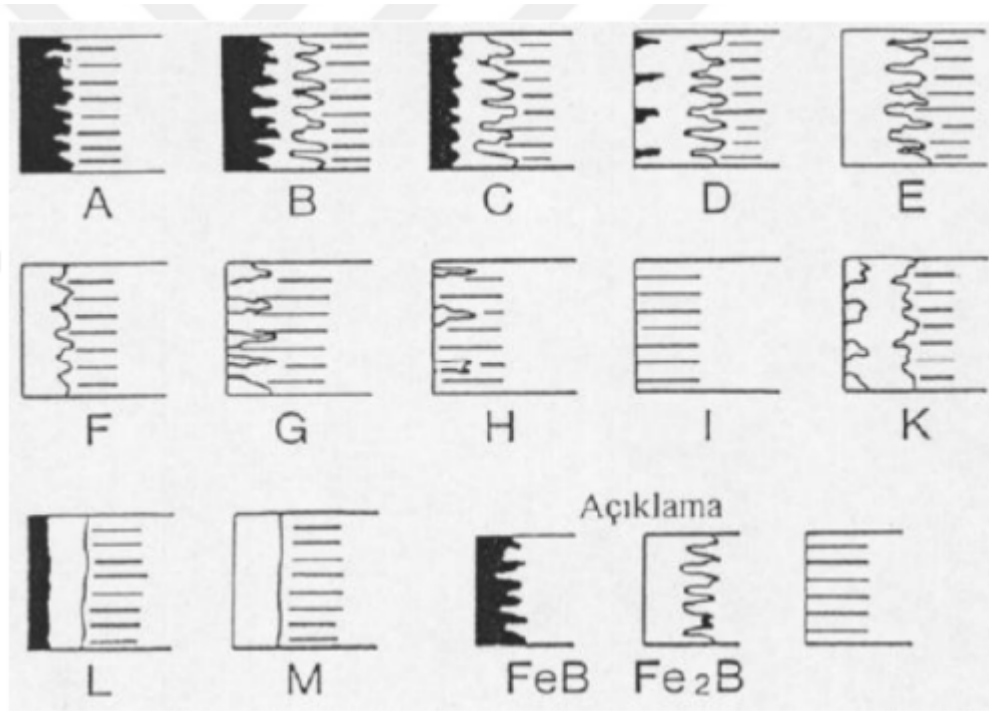
Borlama işlemi demir esaslı malzemelerin yorulma dayanımlarını, akma-kopma dayanımlarını, korozyona dayanımını arttırmakla birlikte, borlama uygulanan malzemelerin plastisite özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Borlama yöntemiyle tungsten karbür malzemelerin yüzey sertliğiyle aynı sertliğin elde edilebilmesinin yanı sıra, teflon malzemelerin sürtünme katsayılarına yakında sürtünme katsayısı elde edilebilmektedir [17] .

Borlama işlemi sıklıkla kullanılan yüzey sertleştirme metodlarından biridir. Borlama ile yüksek yüzey sertliği elde edilebilmesinin yanında, sürtünme katsayısı olarak da çok düşük değerler elde edilmesi çoğu endüstriyel uygulamada tercih edilmesine yol açmaktadır. Borlama işleminde süre ve sıcaklık değerleri önemli olup, yüksek sıcaklıklarda bor atomlarının metal yüzeyine emilimiyle malzeme yüzeyinde ve belirli derinliklere de nüfuz edilmesiyle FeB ve Fe₂B fazları meydana gelmektedir. Bu şekilde borlama işlemi gerçekleşmektedir. Tane sınırları, atom boşlukları, mikro kusurlar ve yüzey pürüzlülükleri gibi malzeme yüzeyinin daha reaktif olduğu yerlerde bor atomları daha nüfuz ederek borür tabakası buralarda daha önce oluşmaktadır. Borlama uygulanan metal içinde ilk borür çekirdekleri oluşmaya başladıktan sonra ortamda yeterli bor yoğunluğu varsa FeB fazı da oluşur. Borlama prosesinin son sürelerinde sadece FeB fazı oluşmakta olup Fe₂B fazına kıyasla daha kısa bir zaman içerisinde büyüme kaydeder. Genel olarak kullanım yerlerinde Fe₂B fazı FeB fazından daha az gevrek olması nedeniyle tek fazlı borür tabakaları(Fe₂B) olması istenmektedir [15, 18].

2.3.1. Borür tabakanın yapısı

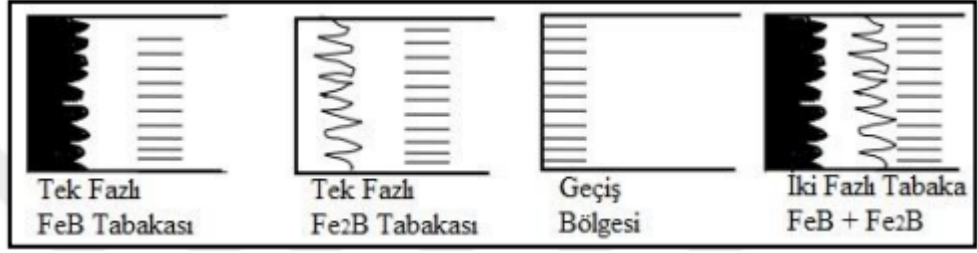
Borür tabakasının kabiliyetlerini etkileyen bazı faktörler vardır. Bunlar borlanan malzemenin kimyasal bileşimi, borlama prosesi, borlama ortamı, işlem sıcaklığı ve

prosesin süresidir. Çeliklerde borlama işlemi sonucunda borür tabakası ve difüzyon geçiş bölgesi oluşmaktadır [22]. Çeliklerde FeB ve Fe₂B olmak üzere genellikle iki katmanlı borür tabakası meydana gelir. Borür tabaka kalınlığı ve özellikleri malzemenin kimyasal bileşimine, mikroyapısına, işlem sıcaklığına, borlama yöntemine ve proses süresine bağlıdır. Genellikle, bor tabakasında testere dişi şeklinde tek bir Fe₂B fazının oluşması istenir. Bununla birlikte farklı borlama yöntemleri ile 14 farklı yapıda borür tabakası elde edilebilmektedir.



Şekil 2.2. Borür tabakası çeşitleri A: FeB; B: Fe₂B ve FeB; C: İki fazlı (ince FeB); D: iki fazlı tabaka (FeB dişleri izole edilmiş); E: Tek fazlı tabaka (Fe₂B); F: tek fazlı tabaka (Fe₂B daha az diş); G: Fe₂B dişli özel tabaka; H: Fe₂B (dişler çok izole edilmiş); I: geçiş bölgesi; K: bozulmuş tabaka; L: iki fazlı tabaka (düz); M: tek fazlı tabaka [19]

Borlanmış demir esaslı malzemelerin içyapıları Şekil 2.3.'de gösterilmiştir. Bu malzeme FeB, Fe₂B veya FeB + Fe₂B ve geçiş bölgesi olmak üzere 3 ana bölümden meydana gelir. Bor elementinin çelik yüzeyinde oluşturduğu her iki katmanın da difüzyon doğrultusunda konumlanmış kolon biçimli kristal yapıya sahip olduğu bilinmektedir [20].



Şekil 2.3. Borür Tabakaları İle Geçiş Bölgesi Temsili [20]

2.3.2. Borlamanın avantajları

Borlama işleminin avantajlarını aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz;

- Oluşan borür tabakası çok yüksek sertlik ve ergime sıcaklığına sahip olmakla birlikte, yüzeydeki sürtünme katsayısı da muadillerine göre oldukça düşüktür. Demir-çelik alaşımlarında 1400-5000 HV arasında yüksek sertlik değerleri elde edilebilir.
- Borlama işlemi farklı boyuttaki ve girintili çıkıntılı yüzeylere de kolaylıkla ve homojen bir şekilde yapılabilmektedir.
- Borlama işleminde yüzey sertlik artışı diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine göre daha fazladır (nitürasyon, sementasyon).
- Bor atomları difüze edilmiş yüzeylerde sürtünme katsayısı düşük olmakla birlikte yağlayıcı kullanımı bu şekilde azaltılmaktadır.
- Borür tabakası yüksek ergime sıcaklığına sahiptir.
- Borür tabakasının sertliği çok yüksek sıcaklıklarda (650 °C) dahi kalıcı olmaktadır.
- Borlama işlemi yapılan çelikler yüksek sıcaklıklarda (850 °C) korozyon dayanımı yüksektir.
- Borlama işlemi yapılan işlem parçasının kullanım ömrü artmakta ve endüstride kullanım alanına göre maliyet düşürülmekte ve verim artırılmaktadır.
- Borlanmış malzemelerin yorulma ömürleri borlanmamış malzemelere göre artmıştır.
- Borlama işlemi uygulanmış malzemeler hidroklorik asit ve sülfürik aside karşı direnci artmaktadır [21-22].

Tablo 2.1.Borlanmış çeliklerin sertliklerinin diğer işlem görmüş malzemelerle karşılaştırılması [25]

Malzemeler	Mikrosertlik (HV)
Borlanmış Yumuşak Çelik	1600
Borlanmış AISI H13 Takım Çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 Çeliği	1900
Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş A2 Takım Çeliği	630-700
Yüksek Hız Çeliği BM 42	900-910
Nitrasyon Çelikleri	650-1700
Karbürlenmiş Düşük Alaşımli Çelikler	650-950
Sert Krom ile Kaplama	1000-1200
B4C	5000
SiC	4000
TiC	3500
Elmas	10000

2.3.3.Borlama işleminin dezavantajları

Borlama işleminin dezavantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir ;

- Borlama prosesi özen ve dikkat gerektiren bir proses olup , uygun sıcaklık , süre ve ortam şartları sağlanmadığında sağlıklı sonuç almak zordur. Bu durum da prosesin uygulanabilirliği zor olmasına yol açar.
- Borlama prosesi nispeten maliyeti yüksek bir prosestir.
- Çelik malzemelerde bazı özellikler daha az gelişmektedir. Bunlar malzemedeki eğilme ve yorulma dayanımlarıdır. Yüzey sertliği arttığından eğilme dayanımı bu malzemelerde kısıtlanmaktadır.
- Borlama prosesinden sonra malzemedeki hacim olarak büyüme olmakta bu da hassas ölçü toleranslarına sahip malzemelerde sıkıntı yaratabilmektedir [24].

2.3.4. Borlama yöntemleri

Borlama esnasında oluşan borür tabakası çeşitli metod ve ortamlarda yüksek sıcaklıkta ve belirli sürelerde oluşturulması mümkündür. Borun kaynağı olan malzeme katı, sıvı, gaz ve plazma ortamında olabilir. Bu bor sağlayıcılar ve ortama göre bor atomlarının metal yüzeyine emdirilmesi için uygulanan metodlar termo-kimyasal yöntem olarak kutu

borlama, pasta borlama, sıvı borlama ve gaz borlama kullanılırken termo-kimyasal olmayan yöntem olarak plazma borlama kullanılabilir [25].

2.3.4.1.Kutu borlama

Kutu borlama işlemi bor sağlayıcı olarak ortamda katı maddenin kullanıldığı, borlanacak malzemenin yüksek bor içeren bir katı malzemeyle aynı kalıba konarak belirli sıcaklık sürede bekletilmesine esasına dayanan bir prosestir. Bu uygulama en çok kullanılan borlama yöntemidir. En yaygın kullanılan yöntem olmasının başlıca sebepleri birçok malzeme için yapılabilir olması, uygulaması kolay olması, maliyet olarak diğer yöntemlerden ucuz olması olarak gösterilebilir. Bu yöntemde ortam sıcaklığı 800-1100 °C sıcaklık ve 1 saat ve daha uzun sürelerde borlama işlemi yapılacak malzemenin etrafına bor sağlayıcı katı malzeme eklenerek genellikle paslanmaz çelik bir kutu ve ya potanın içinde hava geçirgenliğini önlemek için de dolgu malzemesi eklendikten sonra sıkıca kapatılması akabinde bir fırın yardımıyla ısıtılma tabii tutulması işlemidir. Süre ve sıcaklık değeri hedeflenen kaplama kalınlığı ve yüzey sertliğine göre değişmelidir [26].

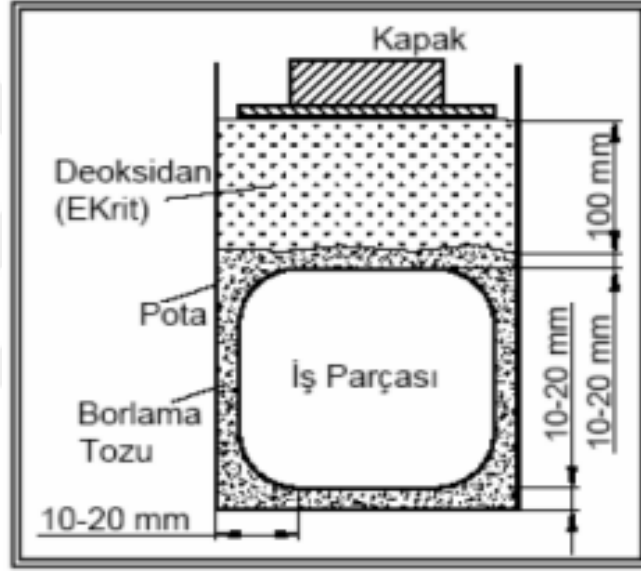
Kutu borlama işleminde kullanılan bor bileşikleri; borkarbür (B_4C), ferrobor ve elementer bordur. Bunlardan en çok tercih edileni borkarbürdür. Aktivatör olarak sodyum bor tetraflorür ($NaBF_4$), potasyum bor tetraflorür (KBF_4), sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve redükleyici olarak silisyum karbür, grafit ve sodyum gibi maddeler kullanılır. Toz haldeki bor verici karışımlar; bor verici bileşikler (bor karbür, saf bor, vb.), alkali metaller, aktivatörler ve dolgu maddelerinin belirli oranlarda karıştırılması ile oluştururlar. Tane boyutu küçük olan tozların proseste kullanımı önemlidir. Bunun nedeni tane boyutunun küçük olması ile borlanacak malzeme yüzeyiyle etkileşim bölgesi artar ve bor atomlarının difüze olması kolaylaşır. Bu şekilde daha sağlıklı ve istenen düzeyde kaplama yapılmış olur [27].

Literatürde borlama kaynağı olarak kullanılan toz karışımları;

- % 90 SiC, % 5 B_4C , % 5 KBF_4
- % 15 Na_2CO_3 , % 85 B_4C
- % 5 KBF_4 , % 50 B_4C , % 45 SiC

- % (3-5) KBF_4 , % (95-97) Amorf bor
- % (20-60) Fe_2O_3 , % (40-80) B_4C şeklinde kullanılmaktadır [28, 29].

Kutu borlama işleminde kullanılacak kutu ya da pota yüksek sıcaklığa dayanıklı olmalıdır. Borlanacak parça etrafına parçanın etrafını minimum 1 cm kalınlıkta saracak şekilde toz karışımı konulur. Kutu ya da potanın üzeri sızdırmaz bir şekilde kapatılarak borlama işlemi fırının içine konur ve koruyucu gaz atmosferiyle korunduğu ortamlarda gerçekleştirilir.



Şekil 2.4. Katı Borlama İşleminin Şematik Gösterimi [30]

2.3.4.2. Sıvı borlama

Sıvı borlamada ortam sıvı haldedir. Bor sağlayıcı bu yöntemde sıvı haldedir. Bu yöntem $700^{\circ}C-1000^{\circ}C$ sıcaklık aralığında yapılmaktadır. Sıvı borlamada 2 ana yöntem bulunmaktadır. Bu 2 ana grup elektrolit ve elektronik olmayan sıvı borlama olarak ayrılmaktadır. Elektroliz devrelerinde olduğu gibi bu yöntemlerde de anot ve katot bölümleri bulunmaktadır. Anot tarafında grafit ve elektrolit malzemesi olarak boraks kullanılmakta birlikte katot malzeme ise borlama işlemi yapılacak demir esaslı malzeme kullanılmaktadır. Borlamanın homojen olması için sıvı borlama esnasında parça döndürülmelidir. Maliyeti düşük olması ve kolay yapılabilmesi avantajları olarak görünmektedir.

Dezavantajları ise şunlardır;

- Borlama işlemi bittikten sonra borlama yapılan parça yüzeyinde tuz kalıntıları kalmakla birlikte ortamda tepkimeye girmemiş borun olması maddi kayba yol açmakta zaman olarak da kayba yol açmaktadır. Çünkü yüzeyin temizlenmesi gerekmektedir.
- Sıvı borlama işlemi için korozyona dirençli bir fırın kullanılmalıdır.
- Sıvı borlamanın kalitesinin artırılması ve uygun şekilde tamamlanabilmesi için banyo viskozitesinin artırılması gerekmektedir. Bunun için de tuz kullanılmakta olup bu durumda maliyet artmaktadır [15].

Tablo 2.2. Sıvı borlama yönteminde kullanılan bazı bor kaynakları [31]

Malzeme	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Teorik Bor Ağırlığı (%)	Ergime Sıcaklığı
Boraks	381,42	11,35	
Susuz Boraks	201,26	21,5	741
Sodyum Bor Forid	109,81	9,85	
Bor Karbür	55,29	78,28	2450
Borik Oksit	69,64	31,07	450
Metabor Asidi	43,83	24,69	

2.3.4.3.Gaz borlama

Bu borlama prosesinde ortam gaz fazındadır. Bu işlemde evaporatörde gaz haline getirilen bor kaynağıyla Ar ve H₂ gazlarının karışması sağlanır. Elde edilen karışım dış ortamdan izole edilmiş paslanmaz çelik bir ortamdaki numunenin üzerine püskürtülmek kaydıyla borlama işlemi yapılır. Gaz borlama prosesinde gaz kaynağı olarak B₂H₆ (diboran) ve BCl₃ (bor klorür) gazları kullanılırlar. Bu gazlar zehirli gazlar olup bu nedenle kullanımları risklidir. B₂H₆ gazının H₂ gazı ile beraber proseste kullanılması halinde daha olumlu sonuçlar alınabilmektedir. Bu prosesin avantajları olarak farklı ölçü ve şekle sahip parçaların kolayca borlanabilmesi, prosesi sonrasında yüzey temizliği v.b. gerektirmemesi, işlem sonrasında homojen kaplama sağlaması, tek fazda bor kaplama yapılabilmesi söylenebilir. Dezavantajları ise zehirleyici ve patlayıcı gazlar kullanılması

ve bu gazların maddi külfeti vardır. Ayrıca bor atomunun buharlaşma sıcaklığı yüksek olduğu için buharlaşması zor olan bir malzemedir [25].

2.3.4.4. Plazma (iyon) borlama

Borlama işleminde kullanılan yöntemlerde genellikle yüksek sıcaklıkta ve bazı durumlarda kontrolsüz şekilde yapılmaktadır. Plazma borlama işlemi daha düşük sıcaklıklarda daha kontrollü şekilde borlama işleminin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Katı fazdaki bir malzemeye enerji verilerek sıvı fazına, sıvı fazdaki malzemeye enerji vererek gaz fazına ve gaz fazındaki malzemeye enerji vererek plazma haline getirilebilir. Plazma borlama Ar (argon) ve H₂ (hidrojen) gazlarıyla beraber bor kaynaklarının BCl₃, BF₃, B₂H₆ yanında bu kaynaklardan daha ekonomik ve daha az korozyon yapıcı özelliği olan boraks, borik asit, bor karbür gibi bor ürünlerini kullanarak 800-1000 °C sıcaklıkta yaklaşık 10-2 Pa basınçta plazma içerisinde yapılan borlama işlemidir. Diğer borlama yöntemleriyle mukayese edilecek olursa plazma borlama yönteminin ekonomik verimlilik, işlemin çok yoğun enerjide gerçekleşmesi, düşük işlem sıcaklığı, borlanan tabakanın bileşim ve derinlik kontrolünün yapılabilmesi ve deneysel parametrelerinin daha kontrol edilebilir olması nedeniyle daha çok avantaja sahiptir [32].

Plazma borlama yöntemleri arasında en çok kullanılanı elektriksel boşalmadır. Bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa ve uygun koşulların sağlanması halinde uygulanan gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerinde ise, bu iki plaka arasında bir elektrik akışı olur. Klasik borlama, tuz borlama ve gaz borlama gibi işlemlerin çevreye kirletici etkisi nedeniyle son yıllarda plazma borlama işlemi daha yoğun olarak çalışılmaktadır [33].

2.3.5. Borlama işleminin endüstride uygulama alanları

Borlama işlemi yapılmış malzemeler, kazandıkları özellikler nedeniyle endüstride birçok alanda tercih edilmektedirler. Başlıca kullanıldıkları sektörleri şöyle sıralayabiliriz; tekstil, seramik sanayi, tıp, iletişim araçları, nükleer sanayi, enerji sektörü, otomotiv, demir-çelik, demir dışı metaller, talaşlı imalat, kimya sektörleri, gıda ve makinedir. Borlama işlemiyle yüksek yüzey sertliği elde edilmesinin yanı sıra, çok düşük sürtünme

katsayıları da elde edilmektedir. Ayrıca korozyon direnci de arttırılan malzemelerin kullanım ömürleri hatırı sayılır şekilde arttırılmaktadır [34].

Tablo 2.3. Borlama işlemiyle elde edilen ürünlerin kullanım alanları [25]

Kullanım Alanları	Kullanım Yerleri
Savunma Sanayi	Seramik plakalarda ve zırhlarda , ateşli silah namlularında ve fişek yapımında kullanılır.
Cam Sanayi	Laboratuar camlarında, bor silikat camlarda, uçak camlarında ve borcamda kullanılır.
Kimya Sanayi	Elektrolit işlemler ve bazı kimyasalların indirgenmesinde kullanılır.
Otomobil Sanayi	Hava yastığı mekanizmalarında ve titreşim sönümleyici malzemelerde kullanılır.
Makine Sanayi	Aşındırıcı ve kompozit malzemelerde zımparalarda ve manyetik cihazlarda kullanılır.
Tarım Sektörü	Biyolojik gelişim ve sentetik gübreler için kullanılır.
Enerji Sektörü	Yüksek ısı transistörlerinde ve gaz türbinlerinde kullanılır.
Elektronik ve Bilgisayar Sanayi	LCD ekranlarında, mikro çiplerde ve CD sürücülerinde kullanılır.
Görüş Sistemleri	Fotoğraf makinelerinde ve mercek camlarında kullanılır.
İletişim Araçları	Televizyonlarda, cep telefonlarında ve modemlerde kullanılır.
Nükleer Sanayi	Nükleer atıkların depolanmasında ve reaktör aksamalarında kullanılır.
Uzay ve Havacılık Sanayi	Sürtünme, aşınma ve ısıya dayanıklı malzemelerde, roket yakıtlarında ve uydularda kullanılır.
Kağıt Sanayi	Geri dönüştürülen kağıtların mürekkeplerinden arındırılmasında kullanılır.
Metalürji	Kaplama alanında kullanılır.
Seramik Sanayi	Fayanslarda ve porselen boyalarında kullanılır.
Koruyucu	Ahşap malzemeler için kullanılır.
Tıp	Antibiyotikler ve yapay organlarda kullanılır.

2.4.Borlama Kinetiği

Borlama prosesi neticesinde elde edilen sonuçların yeterince faydalı olabilmesi için kinetik parametrelerinin optimum şartlarda olması önemlidir. Yüksek sıcaklıklarda, difüzyon kontrolü ile yapılan borlama uygulamaları neticesinde bor emdirilmek istenen metal yüzeyinde, istenilen kalınlıkta ve sertlikteki borür fazları için proses şartlarının doğru belirlenmesi önemlidir. Borür tabakasının büyümesi, bor atomlarının kaplama

yapılmak istenen metal yüzeyine difüzyon yoluyla emilimi sonucu yüzeye dik olarak meydana gelmektedir.. Fick'in birinci yasasına göre difüzyon, birim yüzeyde birim zamanda difüze olan madde miktarı olarak tanımlanır. Borlama işleminde, ortam sıcaklığına, borlama ortamındaki bor miktarına, borlama hızına ve zamana bağlı olarak tabaka kalınlıkları değişiklik göstermektedir.. Difüzyon olayı konsantrasyon yoğunluğu fazla olan bölgeden konsantrasyon yoğunluğu az olan bölgeye doğru, iki ortamın konsantrasyonu eşitlenene kadar devam eder ($dc/dx = 0$). Fick'in birinci yasası sayesinde bor elementinin FeB ve Fe₂B fazları içindeki konsantrasyonu tahmin edilebilmektedir [35].

2.5.Difüzyon Mekanizması

Difüzyon, atomların ısı enerjisi etkisi ile ilk denge konumlarını değiştirerek yeni denge konumuna geçmesidir. Atom içi hareketleri iki aşamada tanımlayabiliriz. Birinci aşama; ısı enerjisi etkisi ile atomların kendi denge konumları çevresindeki küçük titreşim hareketleridir. İkincisi aşama; atomların, ısı enerjisi etkisi ile bir denge konumundan diğerine atlayarak yaptıkları uzak mesafe hareketleridir. Homojen malzemelerde aynı yapıya sahip parçacıkların difüzyon olayında kütle taşınması görülmezken, homojen olmayan malzemelerde, farklı konumlara difüzyon etmelerine neden olduğundan önem arz etmektedir. Difüzyon, bir konsantrasyon gradyanından hareket eder ve denge durumunda sona erer. En hızlı difüzyon gazlarda görülürken, sıvılarda difüzyon daha yavaş gerçekleşmektedir. Katı malzemelerde meydana gelen difüzyon, gaz ve sıvılardaki difüzyondan çok daha yavaştır. Katılardaki difüzyon genellikle kristal kafes kusurları bölgelerinde gerçekleşir [35].

Difüzyon mekanizmasının gerçekleşmesi için ihtiyaç duyulan koşullar:

- Boş bir komşu kafes noktası olmalıdır.
- Yeterli enerjiye sahip olmalıdır. Atom, ısı işleminden elde edilen enerji ile uyarılarak mevcut yerinden ayrılarak kendi bölgesindeki boşluğa geçer ve yeni konumuna doğru hareket ederken komşu atomları sıkıştırarak geçer. Bu enerji bariyerinin aşılması için gerekli enerjiye aktivasyon enerjisi denir. Aktivasyon enerjisi, aynı zamanda difüzyon için gerekli enerji bariyeri olarak isimlendirilir.

Difüzyon hızını etkileyen parametreler şunlardır;

1. Malzemenin hangi fazda olduğuna göre difüzyon hızı değişir(katı(toz), sıvı ve gaz fazları). Gaz fazındaki atomlar daha hızlı difüze olurlar.
2. Ortam sıcaklığına bağlı olarak difüzyon hızı da değişmektedir. Sıcaklık azalırsa moleküllerin ortalama kinetik enerjisi azalacağından difüzyon hızı da azalır. Sıcaklık arttıkça difüzyon hızı artar.
3. Molekül veya tanecik boyutu difüzyon hızını değiştirir. Küçük molekül ve tanecik yapısına sahip maddelerin difüzyon hızı daha hızlı olur.
4. Difüzyonun olduğu ve ilerlediği alan arttıkça difüzyon hızı da artar.
5. Difüzyon mesafesi arttıkça difüzyon hızı da azalır [35].

BÖLÜM 3

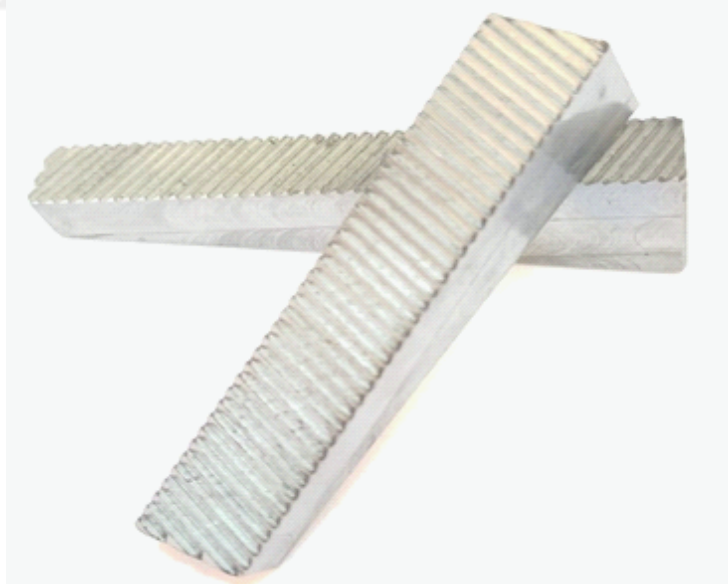
MATERYAL VE YÖNTEMLER

3.1. Materyal

Bu çalışmada Tablo 3.1’de kimyasal bileşimi verilen ve HASÇELİK VE HALAT SANAYİ’den temin edilen X210Cr12(AISI D3) soğuk iş takım çeliğinden üretilmiş olan çektirme çeneleri kaplanacak malzeme olarak kullanılmıştır (Şekil 3.1).

Tablo 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan X210Cr12 (AISİ D3) soğuk iş takım çeliği kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)

Malzeme	C	Cr	Mn	Si	P	S	Fe
X210Cr12	2,00	11,5	0,33	0,26	0,01	0,005	Kalan



Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan X210Cr12 soğuk iş takım çeliği çektirme çenesi

3.2 Yöntem

3.2.1 Kaplama yöntemi

Bu çalışmada çektirme çenesi olarak kullanılan soğuk iş takım çeliklerinin borlanabilirliği Termokimyasal difüzyon yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Bu amaçla deney numunelerinin öncelikle yüzeyleri yağ, kir vb. kalıntılardan arındırılmak için alkol ile temizlenmiştir. Sonrasında paslanmaz çelikten üretilen potaların içerisine %90 bor karbür (B_4C) ve %10 sodyumtetrafloroborat ($NaBF_4$) kaplama tozu karışımı hazırlanarak bir miktar eklenmiştir. Çektirme çene numuneleri potalara yerleştirildikten sonra karışım tozları örneklerin her tarafını kaplayacak şekilde potalar doldurulmuş ve ağızları sıkıca kapatılmıştır (Şekil 3.2). 900, 950 ve 1000 °C’de 4 saat süre ısıtım fırınında kaplama işlemi vakumsuz ortamda gerçekleştirilmiş ve fırından çıkarılan potalar önce suda, ardından açık hava ortamında soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 3.2 Termokimyasal yöntem ile borlama işlemi süreci

3.2.2 Metalografik numune hazırlama

Borlama işlemi sonucunda elde edilen örneklerin dış yüzeyleri kalıntılardan temizlenmiş ve metalografik incelemeler için 10*10*15 mm ebatlarında hassas kesme cihazıyla (Metkon Metacut 250 Abrasive Cutter) çekme çenelerinden numuneler alınmıştır. Alınan numunelerin dişli ve düz kesitleri görüntülenecek şekilde bakalite alma cihazı (Metkon (Ecopress50 Mounting Press)) yardımıyla kalıplanmış ve 120-400-800 ve 1200 mesh numaralı zımparalar ile zımparalama ve sonrasında 3 micron elmas parlaticı yardımıyla

parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3). Hazırlanan örneklerin yüzeyleri %3'lük Nital dağlayıcı ile 40-60 saniye süreyle dağlanmıştır.



Şekil.3.3 Numune hazırlamada kullanılan Hassas kesme, kalıplama, zımparalama ve parlatma cihazları

3.2.3 Optik mikroskop incelemesi

Metalografik olarak hazırlanan örneklerin Nikon MA 100 metal mikroskobu ve Clemex görüntü analiz sistemi yardımıyla kaplama kalınlıkları ve morfolojileri incelenmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Çalışmada kullanılan optik mikroskop ve görüntü analiz sistemi

3.2.4. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), EDS (Enerji Yayımlı X-Işını Analizi) analizleri

Tescan MAIA3 XMU Elektron mikroskobu kullanılarak (Şekil 3.5) mikroyapı analizleri yapılmıştır. Örneklerde borlama sıcaklığı ile dişli ve düz yüzeylerde oluşan kaplama morfolojileri tartışılmıştır.



Şekil 3.5 Tescan MAIA3 XMU Elektron mikroskobu ve EDS dedektörü

3.2.5. Mikrosertlik ve kırılma tokluğu incelemesi

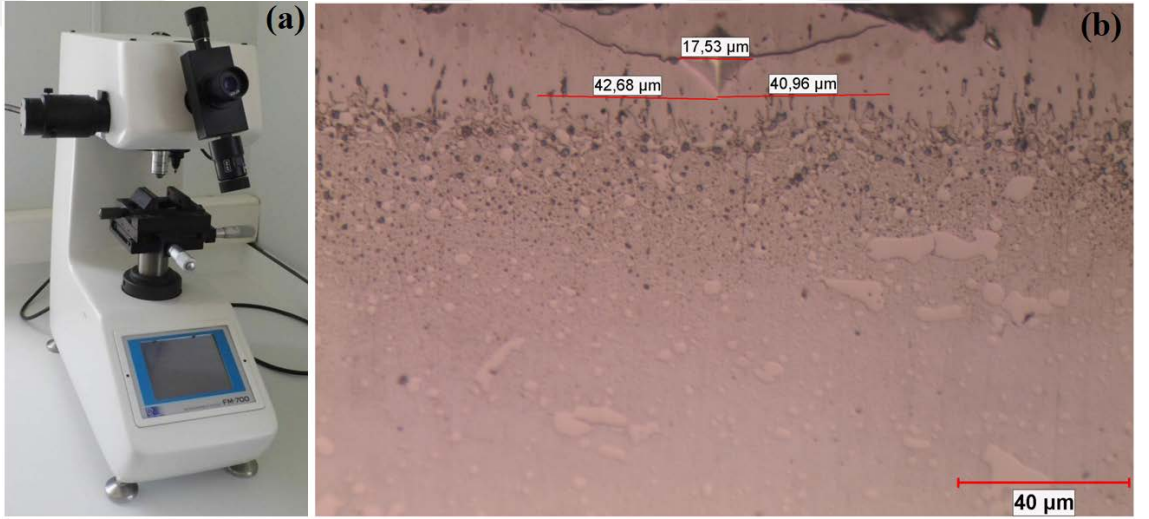
Future Tech FM-700 mikrosertlik cihazı yardımıyla (Şekil 3.6) 25 gf yük altında 10 saniye süreyle ana malzemedeki kaplama bölgesine belirli aralıklarla mikrosertlik dağılımı değerleri elde edilmiştir. Yüzeyde oluşan kaplama tabakasının kırılma tokluğu (Kç), mikrosertlik izi köşelerinden gelişen çatlak uzunlukları dikkate alınarak tahmin edilmiştir. Kırılma toklukları ve mikrosertlik ölçümleri için aynı mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Faz yapısı, çatlak uzunlukları ve kaplama kalınlıklarını tespit etmek için Nikon (MA 100) markalı mikroskop ve Clemex (image analysis system) görüntü analiz

sistemi kullanılmıştır. Kırılma tokluğu hesaplaması için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

$$KC = A.P/c^{3/2} \quad (3.1)$$

$$A = 0.028 (E/H)^{1/2} \quad (3.2)$$

burada A artık girinti katsayısıdır, P yüküdür, c çentik çatlak uzunluğunun yarısıdır, H sertliktir ve E Young modülüdür. Alınan E değerleri yaklaşık olarak 300 GPa'dır [36].



Şekil 3.6 Future Tech FM-700 mikrosertlik cihazı (a), mikrosertlik izi köşelerinden gelişen çatlak uzunlukları (b)

3.2.6 XRD (X-Işını Difraksiyonu) analizi

Yüzeyi düzgün olarak hazırlanan örneklerin XRD ölçümleri Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Rigaku Smartlabtm X-Işını Difraktometresi (Şekil 3.7) cihazında gerçekleştirilmiştir. Difraktometrede süzölmüş 1,54060 Å dalgaboylu Cu-K α ışını kullanıldı. Alınan tüm difraktogramlar esnasında difraktometrenin 2 θ açısı için 5 ve 90° aralığında tarama hızı 2°/dakika olarak seçildi. Elde edilen sonuçlar incelenerek örnek yüzeylerinde (kaplamalarda) oluşan faz yapıları belirlendi.



Şekil 3.7. Rigaku Smartlabtm X-Işını Diffraktometresi

3.2.7. Aşınma testi

Çekme çenesi örneklerinin yüzeyleri deneye başlamadan önce kirlere arındırılmış ve 15 N yük altında aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. İşlemsiz, 900 °C, 950 °C ve 1000 °C’de borlanan örneklerin testten önce ön tartımları yapılmıştır. Aşınma testleri için AISI 5210 çelik bilye kullanılarak 300 mm/s hızda, 15 N yükte ve 14 mm aşınma izi çapında Turkyus POD&HT&WT, Turkey marka bilyeli disk aşınma cihazı kullanılarak oda sıcaklığında, normal atmosfer koşullarında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testinin uygulanması sırasında bilgisayar ortamında sürtünme katsayısı (COF) değerleri otomatik olarak kaydedilerek, excel programında COF grafikleri çıkarılmıştır. Aşınma testi sonucunda aşınma izlerinin genişliği ve hacmi kayıplarının belirlenmesi amacıyla tüm örneklerden aşınma izi fotoğrafları (SEM) ve 3D profilometre görüntüleri elde edilmiştir. Ayrıca aşınma yolundan çizgisel olarak EDS (Enerji Yayılımlı X-Işını Analizi) analizleri de incelenmiştir. Şekil 3.8’de gösterilen aşınma testi yapılmış örneklerin makro fotoğrafları incelendiğinde işlemsiz malzeme yüzeyinde oluşan aşınma yolunun

genişliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. 900 °C’de 6 saat süreyle yüzeyi borlanmış çekme çenelerinin yüzeyinde oluşan aşınma yolu genişliği en az olduğu görülmüştür. Sonrasında sırasıyla 950 °C ve 1000 °C’de borlanan örneklerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 3.8. 15N yük altında aşınma testi yapılmış örneklerin makro yüzey fotoğrafları

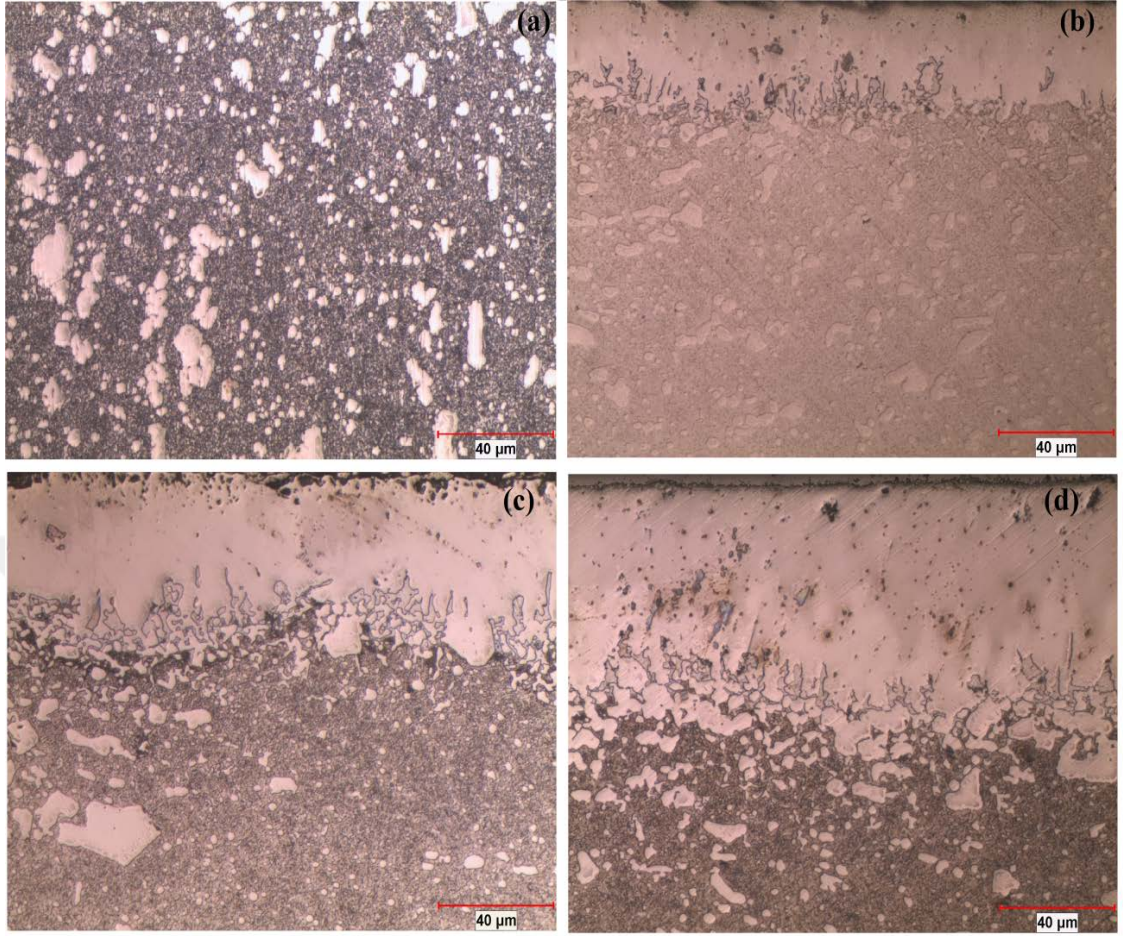
BÖLÜM 4

BULGULAR

Bu bölümde yüzeyi 900, 950 ve 1000 °C sıcaklıklarda 4 saat süreyle borlanan tel çekme çenelerinin Optik, SEM, EDS incelemeleri, XRD analiz sonuçları, kaplama kalınlıkları, mikrosertlik ve kırılma tokluğu sonuçları, aşınma testi sonuçları verilerek tartışılacaktır.

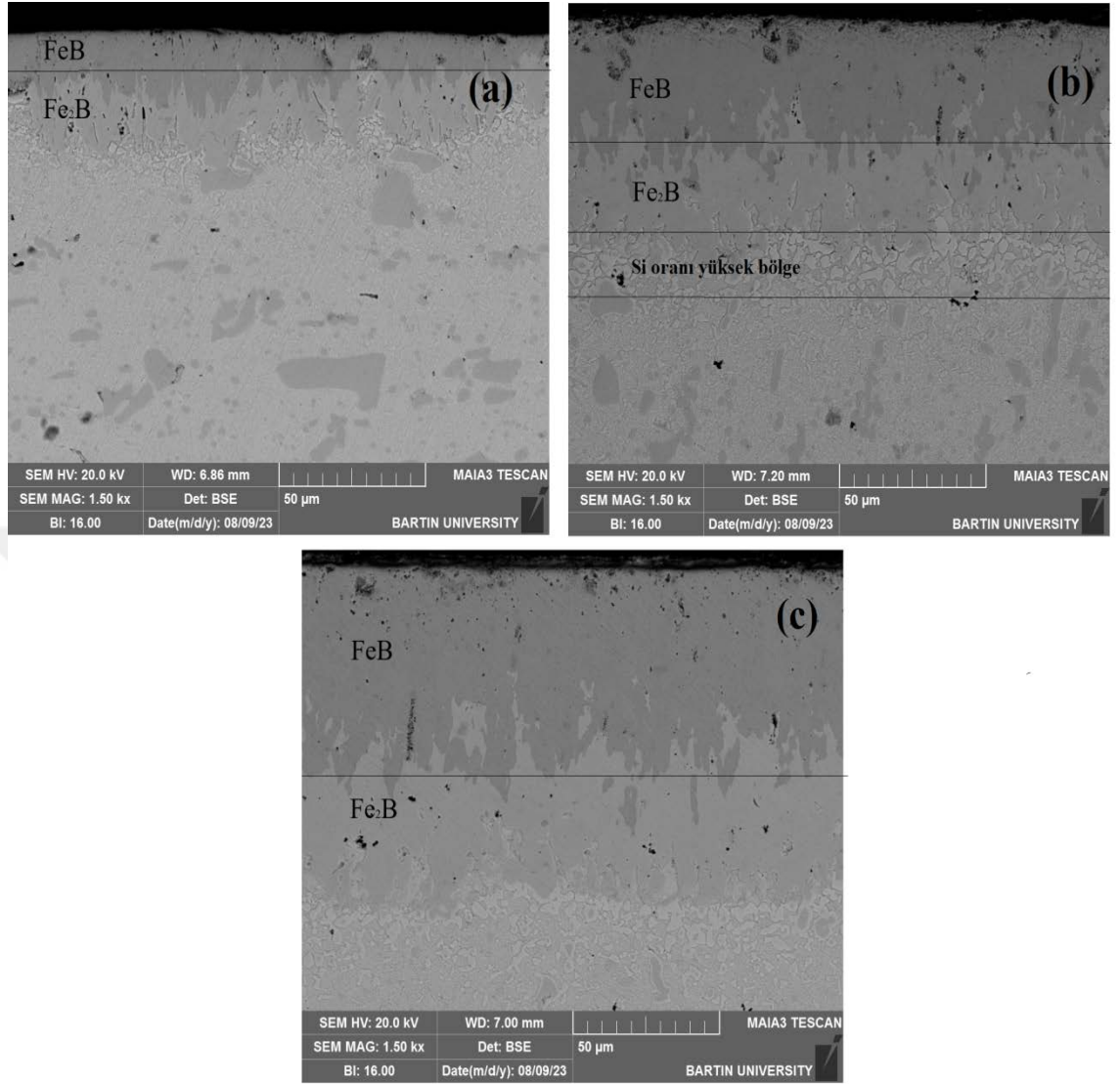
4.1 Optik mikroskop, SEM ve EDS incelemeleri

İşlemsiz, 900°C, 950°C ve 1000 °C’de 4 saat süreyle borlama ile kaplanan örneklerin optik mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Bu fotoğraflar incelendiğinde işlemsiz örnekte (Şekil 4.1-a) AISI D2 takım çeliğinin mevcut morfolojisi görülmektedir. Beyaz olarak görünen krom karbür fazlarının kaplama oluşturulmuş örneklerde küresel morfolojilerinin kaplama bölgelerine yaklaştıkça küresellikten uzaklaştığı ve etkileşime girdiği gözlenmiştir. Kaplanan her üç örnekte de yüzeyde homojen dağılan bir kaplama tabakasının oluşturulmuş olduğu açıkça görülmektedir. Kaplama sıcaklıklarındaki artış ile beraber kaplama kalınlıklarının artışı açıkça görülmektedir.



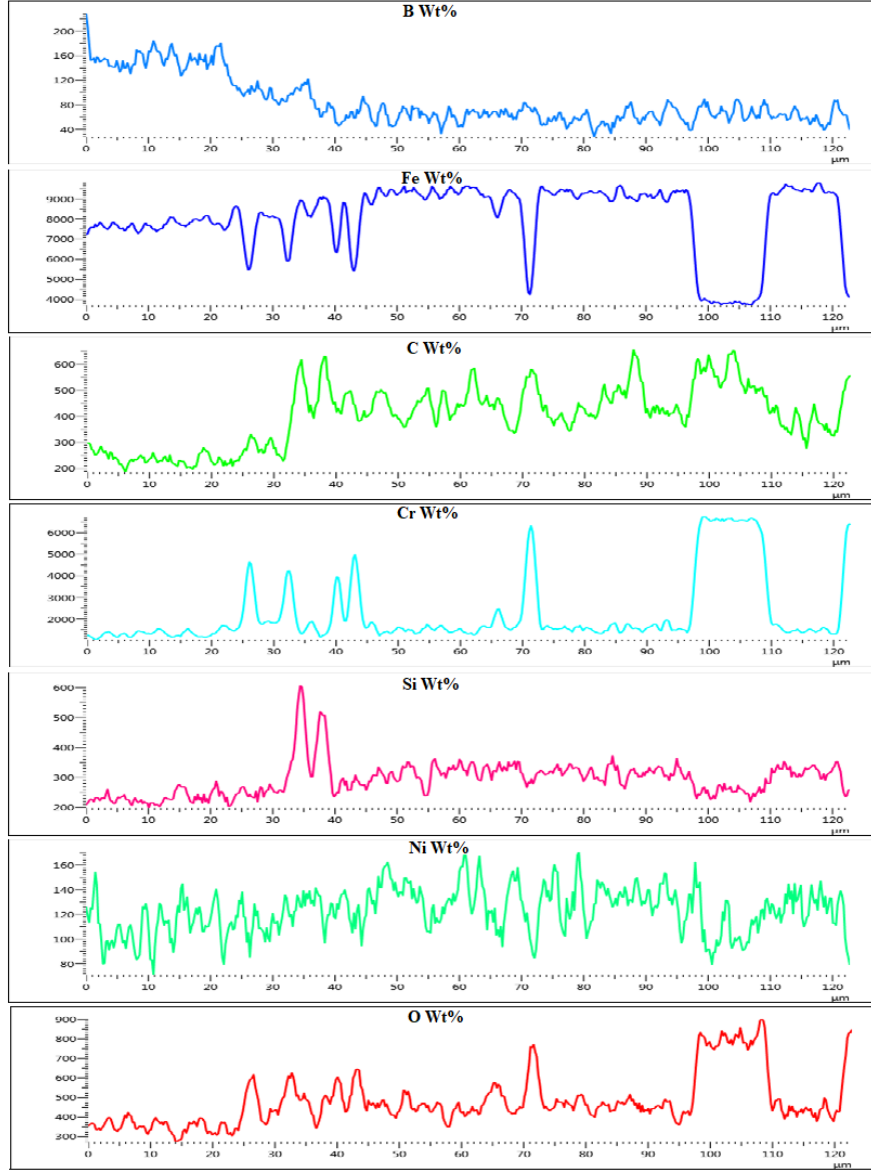
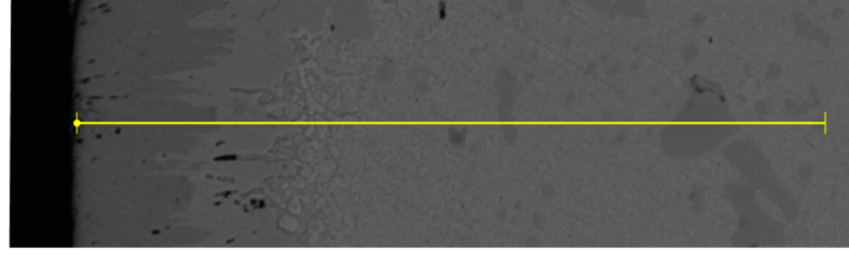
Şekil 4.1 İşlemsiz (a) 900 °C (b), 950 °C (c) ve 1000 °C (d) sıcaklıklarda 4 saat süreyle borlanan tel çekme çenelerinin Optik mikroyapı fotoğrafları

Borlama işlemi ile çelik alaşımlarında belirli bileşimlere sahip tek veya çift fazlı bir kaplama tabakası oluşturulabilir. Yüzeyde ortorombik kristal yapıya ve ağırlıkça bor içeriği daha fazla olan FeB tabakası, iç katmanda ise tetragonal kristal yapıya sahip Fe₂B tabakası meydana gelmektedir [37]. SEM fotoğrafları (Şekil 4.2) incelendiğinde kaplama bölgesinde her üç örnek için iki katmanlı bir yapının oluştuğu optik fotoğraflara nazaran daha net bir şekilde görülmektedir. Her üç örnekte de dış yüzeyde FeB iç katmanda ise Fe₂B morfolojileri gözlenmiştir. Borlama esnasında çelik bileşiminde bulunan elementler yeniden dağılırlar. Bu dağılım sırasında karbon ve silisyum elementlerini FeB ve Fe₂B tabakaları içerisinde çözülemediğinden, borür tabakasından altlık malzemeye doğru itilirler. Geçiş bölgesinde, altlık malzeme ve borür tabakasından farklı bir mikroyapı oluşur [38].

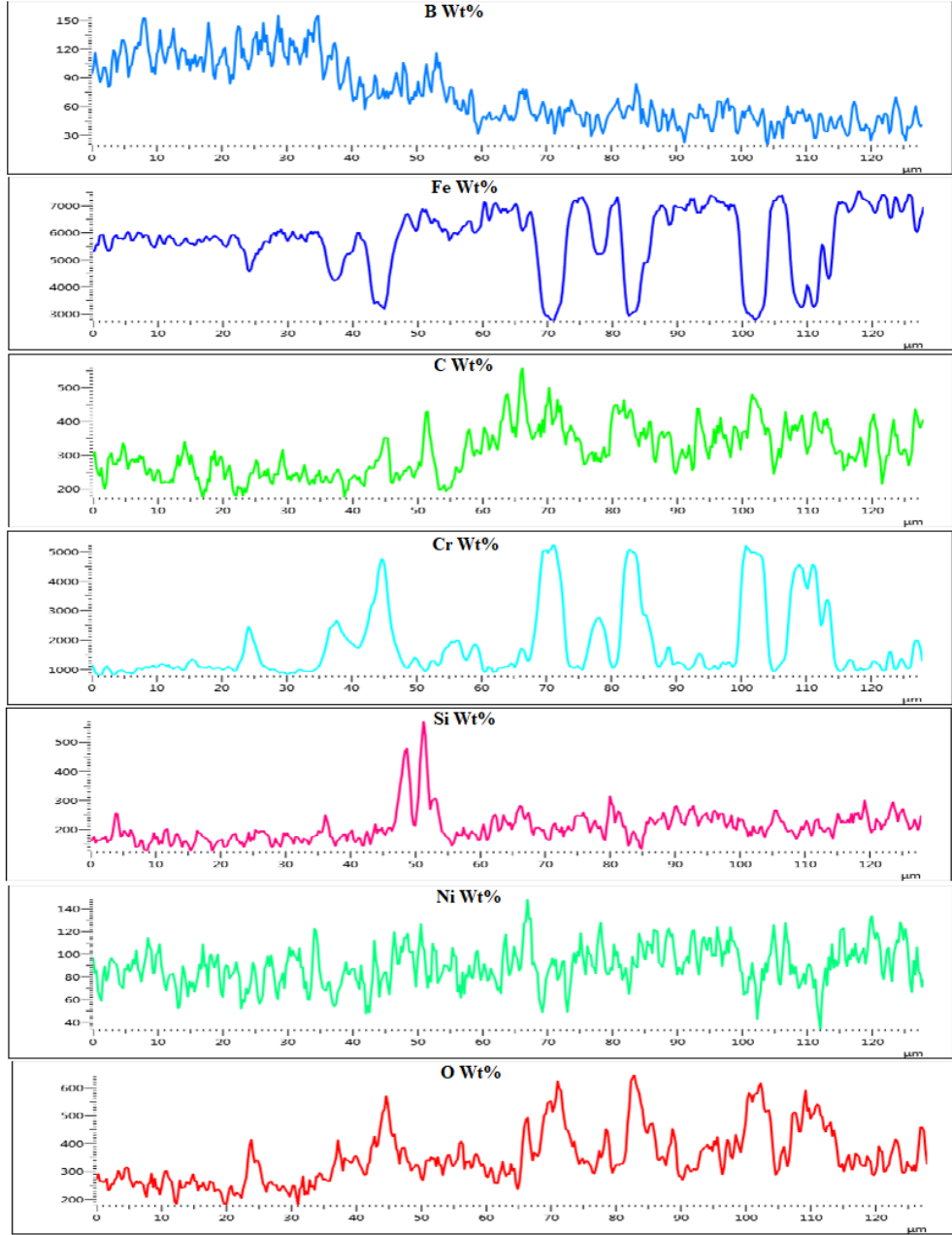
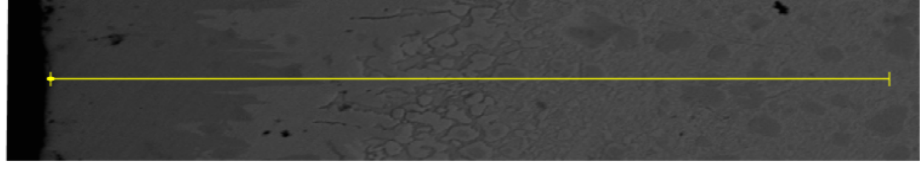


Şekil 4.2. 900 °C (a), 950 °C (b) ve 1000 °C’de (c) termokimyasal borlama işlemiyle elde edilen kaplama tabakaları SEM fotoğrafları

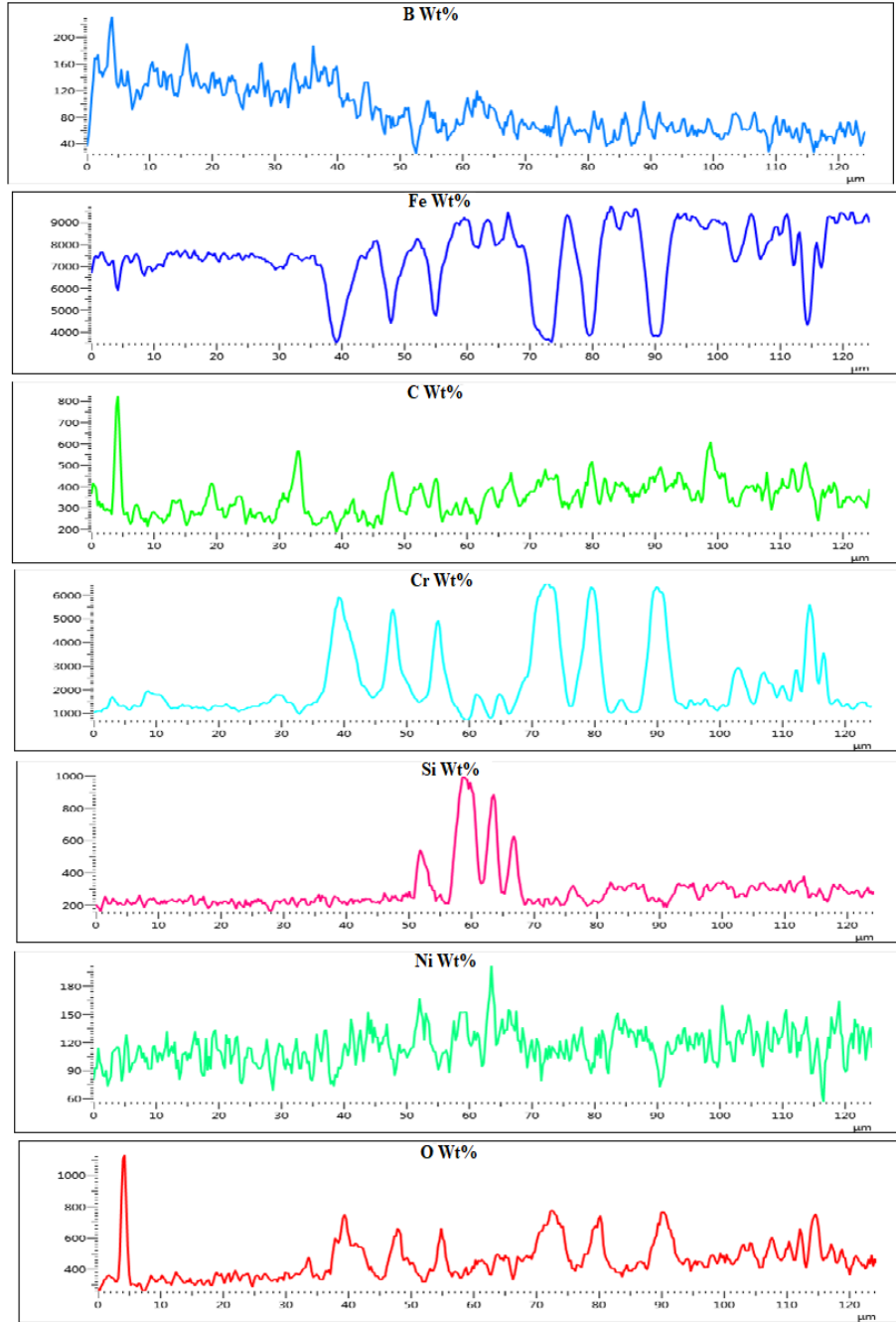
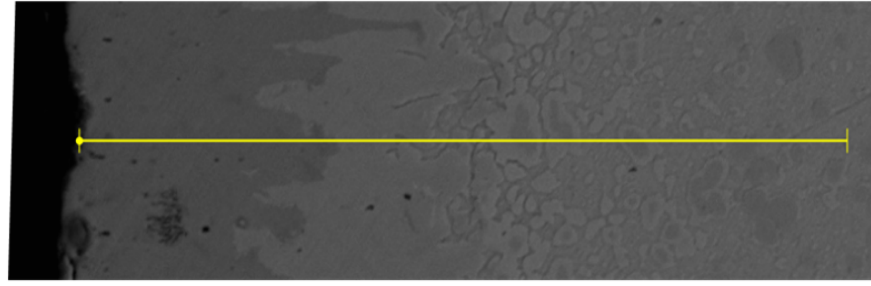
900 °C, 950 °C ve 1000 °C’de 4 saat süreyle borlanan örneklerden elde edilen çizgisel EDS analizi sonuçları sırasıyla Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5’te verilmiştir. Her üç örnek için kaplamadan altlık malzemeye doğru gidildikçe ağırlıkça Bor miktarı azalırken Fe miktarında artış gözlenmiştir. Ancak geçiş bölgesinde ağırlıkça Si elementinin her üç örnekte de pik yaptığı görülmektedir. Bu durum Şekil 4.2’de gösterilen mikroyapıyı destekler niteliktedir. Literatürle uyumlu olarak Borür tabakası içerisinde çözünemeyen Si elementi geçiş bölgesinde yığılmıştır.



Şekil 4.3. 900 °C’de termokimyasal borlama işlemiyle 4 saat süreyle elde edilen kaplama tabakası çizgisel EDS analizi grafiği



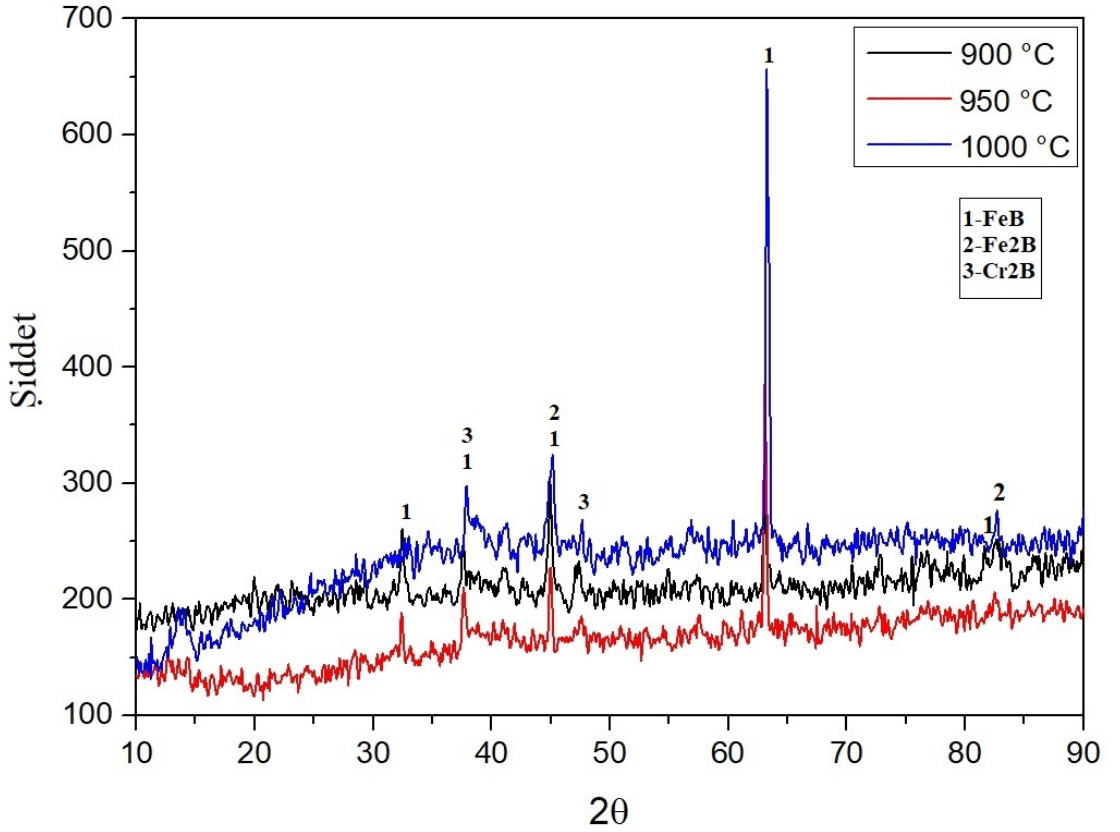
Şekil 4.4. 950 °C’de termokimyasal borlama işlemiyle 4 saat süreyle elde edilen kaplama tabakası çizgisel EDS analizi grafiği



Şekil 4.5. 1000 °C'de termokimyasal borlama işlemiyle 4 saat süreyle elde edilen kaplama tabakası çizgisel EDS analizi grafiği

4.2. XRD Analiz Sonuçları

XRD sonuçları incelendiğinde en baskın pikin $2\theta=63^\circ$ 'de FeB (Referans Kodu:00-032-0463) ve diğer piklerinde ağırlıklı olarak Fe₂B (Referans Kodu:00-036-1332) ve Cr₂B (Referans Kodu:01-089-4876) fazlarından oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi her 3 örnekte de benzer durum gözlenmiştir.



Şekil 4.6 Borlanan örneklerin kaplama yüzeylerinden elde edilen XRD analizi grafiği

Alaşımın ortalama kristalit boyutu D , Debye-Scherrer denklemi kullanılarak hesaplandı (Denklem 4.1).

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4.1)$$

burada K , bir sabittir (0,94), λ ; X-ışını dalga boyudur (Cu $K\alpha$ için 1,5406 Å), β ; 2θ ile ilgili tepe noktasının tam genişlikteki yarı maksimumudur (FWHM). Dislokasyon

yoğunluğu, δ , XRD deseninden elde edilen ortalama kristalit boyutunun bir fonksiyonudur (Denklem 4.2);

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (4.2)$$

Mikro gerinim, ε aşağıdaki denklem 4.3 kullanılarak hesaplanmıştır [39] Tablo 4.1’de en baskın pik olan FeB için hesaplanan ortalama kristalit boyutu (D), diskolasyon yoğunluğu (δ) ve mikrogerinim (ε) değerleri gösterilmektedir.

$$\varepsilon = \frac{\beta}{4 \tan \theta} \quad (4.3)$$

Tablo 4.1 Borlanan örneklerin yüzeylerinden elde edilen XRD verileri kullanılarak hesaplanan ortalama kristalit boyutu (D), diskolasyon yoğunluğu (δ) ve mikrogerinim (ε) değerleri.

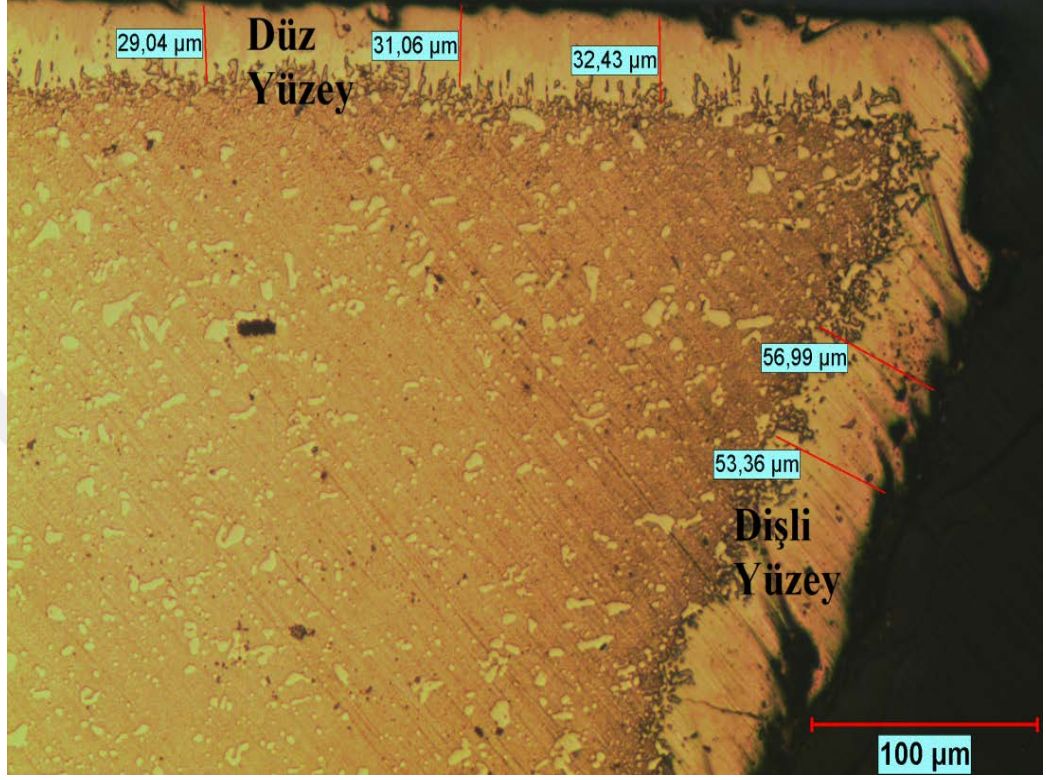
Örnek	Faz	D (nm)	δ (nm) ⁻² x10 ⁻³	ε
900 °C’de 4 saat	FeB (002)	54,14	0,34	0,11
950 °C’de 4 saat	FeB (002)	49,05	0,42	0,08
1000 °C’de 4 saat	FeB (002)	50,70	0,39	0,08

Kaplama sıcaklığının 900 °C’den 950 °C’ye artmasıyla FeB (002) fazının ortalama kristal boyutunun önce 54,14 nm’den 49,05 nm’ye azaldığı, kaplama sıcaklığı 1000 °C’ye arttığında ise 50,70 nm değerine yükseldiği ancak 900 °C’de kaplanmış olan örnekten düşük kaldığı görülmektedir. Dislokasyon yoğunluklarının ise kristal boyutları ile ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Mikrogerinim değerleri ise kaplama sıcaklığının 900 °C’den 950 °C’ye artmasıyla azalmıştır. Ancak 1000 °C’ye yükselmesiyle aynı kalmıştır.

4.3. Kaplama Kalınlıkları

Elde edilen örneklerin kaplama kalınlıkları borlama sıcaklığı arttıkça artmıştır. Örnek yüzeylerinin dişli kısımlarında kaplama kalınlığı düz kenarlara göre daha fazla olmuştur (Şekil 4.7). 900 °C’de borlamada yaklaşık 16 μm , 950 °C’de borlamada yaklaşık 15 μm ve 1000 °C’de borlamada yaklaşık 34 μm kalınlık farkı olmuştur (Şekil 4.8 ve Tablo 4.2).

Bu da dişli bölgelerin yüzey alanının daha geniş ve dişli aralarında giren kaplama tozunun temas yüzeyinin fazla olması nedeniyle difüzyonunun daha fazla olmasıyla açıklanabilir.



Şekil 4.7. Dişli ve yan yüzeylerde elde edilen kaplama kalınlığı optik mikroskop fotoğrafı

Nispeten daha sert bir faz olan FeB fazının kaplama sıcaklığına bağlı olarak toplam kaplama kalınlıkları baz alındığında düz yüzeylerde 900 °C’de %65.5, 950 °C’de %55.75 ve 1000 °C’de ise %53.97 oranında bulunduğu gözlenmektedir. Buradan her ne kadar FeB tabakasının her üç örnekte de %50 den fazla oranda yer aldığı görünse de kaplama sıcaklığının artışıyla düz yüzeylerde ortalama FeB tabasının yerine Fe₂B tabakasının oluşma eğiliminin arttığı söylenebilir (Şekil 4.8 ve Tablo 4.2).

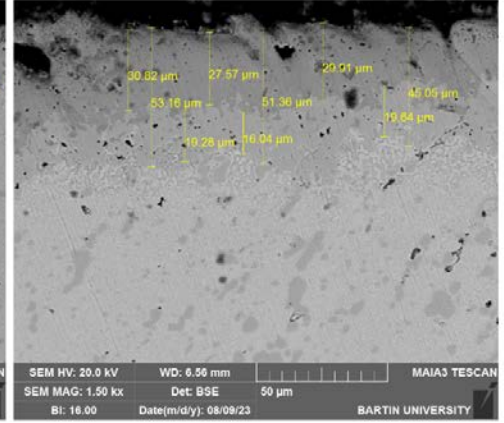
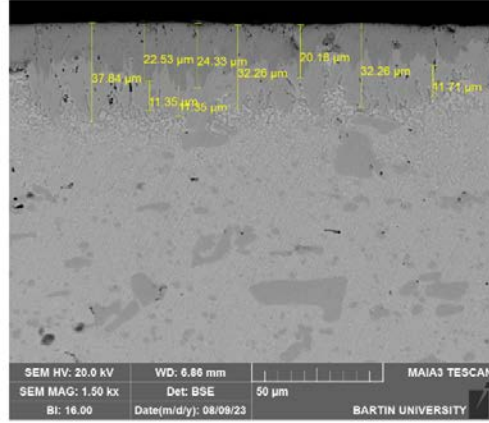
Tablo 4.2. Örneklerin borlama sonucu elde edilen kaplama kalınlıkları

Örnek	Ortalama Kaplama Kalınlığı (Düz Yüzeyler (µm))			Ortalama Kaplama Kalınlığı (Dişli Yüzeyler (µm))			Kalınlık Farkı (µm) (Toplam)
	FeB	Fe ₂ B	Toplam	FeB	Fe ₂ B	Toplam	
900 °C'de 4 saat	22,35	11,77	34,12	29,43	20,42	49,86	49,86-34,12= 15,74
950 °C'de 4 saat	31,35	24,88	56,23	37,84	33,16	71,00	71,00-56,23= 14,77
1000 °C'de 4 saat	35,15	29,97	65,12	59,05	40,21	99,26	99,26-65,12= 34,14

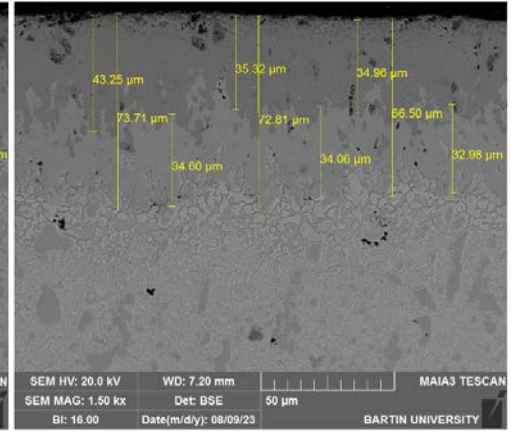
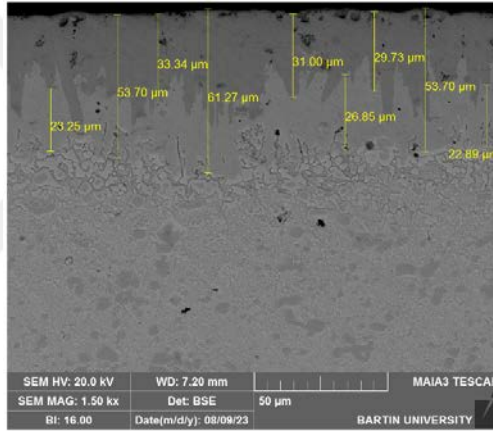
Düz Yüzey

Dişli Yüzey

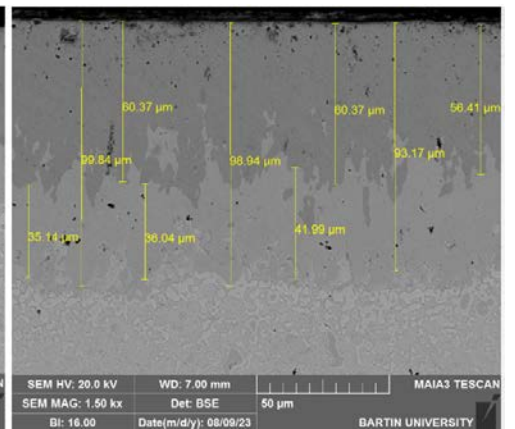
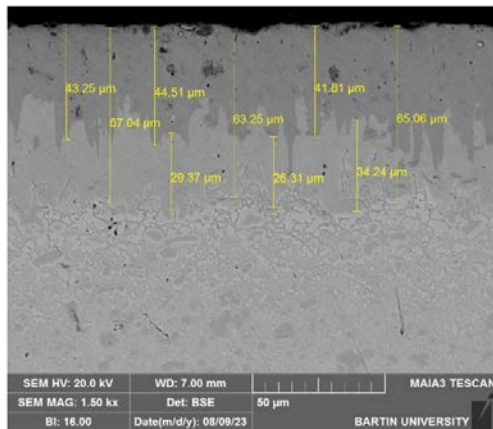
900 °C'de 4 saat Borlama



950 °C'de 4 saat Borlama



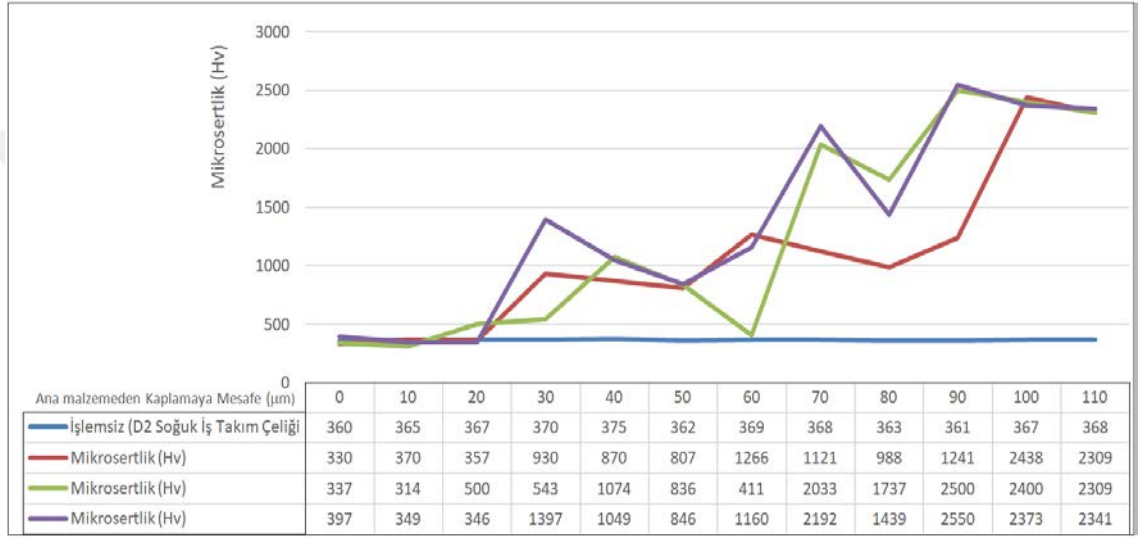
1000 °C'de 4 saat Borlama



Şekil 4.8. Dişli ve yan yüzeylerde elde edilen kaplama kalınlığı SEM mikroyapı fotoğrafları

4.4. Mikrosertlik ve Kırılma Tokluğu Sonuçları

Borlama işlemi ile mevcut malzemeye yapılan ısıl işlemler ile elde edilemeyen sertlik ve aşınma değerleri elde edilebilmektedir. Örneklerin mikrosertlik değerleri incelendiğinde (Şekil 4.9) mikrosertlik değerlerinin yüzeyde işlemsiz malzemeye göre yaklaşık 8 kat artarak 2000-2500 HV değerlerine kadar ulaştığı gözlenmiştir.



Şekil 4.9. Borlanmış örnek yüzeylerinden elde edilen mikrosertlik değerleri dağılımı grafiği

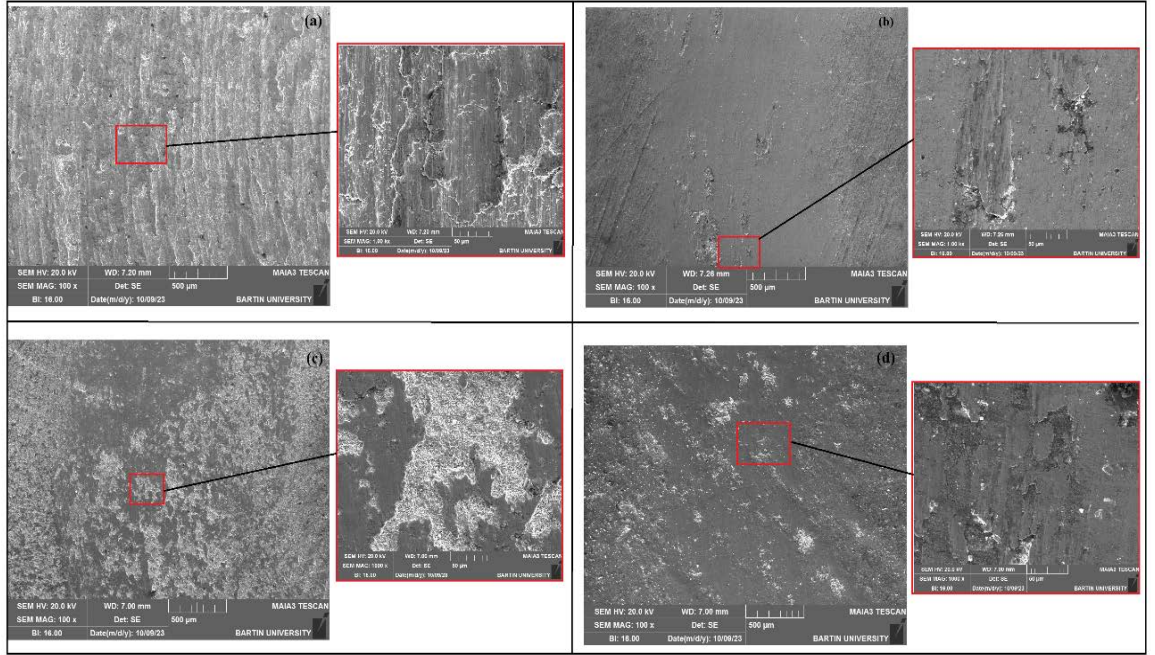
Örneklerden üç farklı bölgeden elde edilen kırılma tokluğu değerleri Tablo 4.3 gösterilmektedir. Kaplama sıcaklığının ve kalınlığının artmasıyla beraber ortalama kırılma tokluk değerleri bir miktar artsa da birbirine yakın olan değerler elde edilmiştir. Bu durum mikrosertlik değerleriyle uyumludur. Her üç örnekte de kaplama tabakalarında mikrosertlik değerlerinin de birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Yanlıca kapla kalınlıklarına bağlı olarak Şekil 4.9'da görülen mikrosertlik dağılımı değişiklik göstermektedir.

Tablo 4.3. Örneklerin borlama sonucu elde edilen kaplama kalınlıkları

Örnek	Kırılma Tokluğu Değerleri $K_{\text{ç}}$ (MPa m ^{1/2})			Ortalama Kırılma Tokluğu Değerleri $K_{\text{ç}}$ (MPa m ^{1/2})
	$K_{\text{ç1}}$	$K_{\text{ç2}}$	$K_{\text{ç3}}$	
900 °C'de 4 saat	0,80	0,82	1,03	0,88
950 °C'de 4 saat	0,73	0,87	1,37	0,99
1000 °C'de 4 saat	0,75	0,68	1,76	1,06

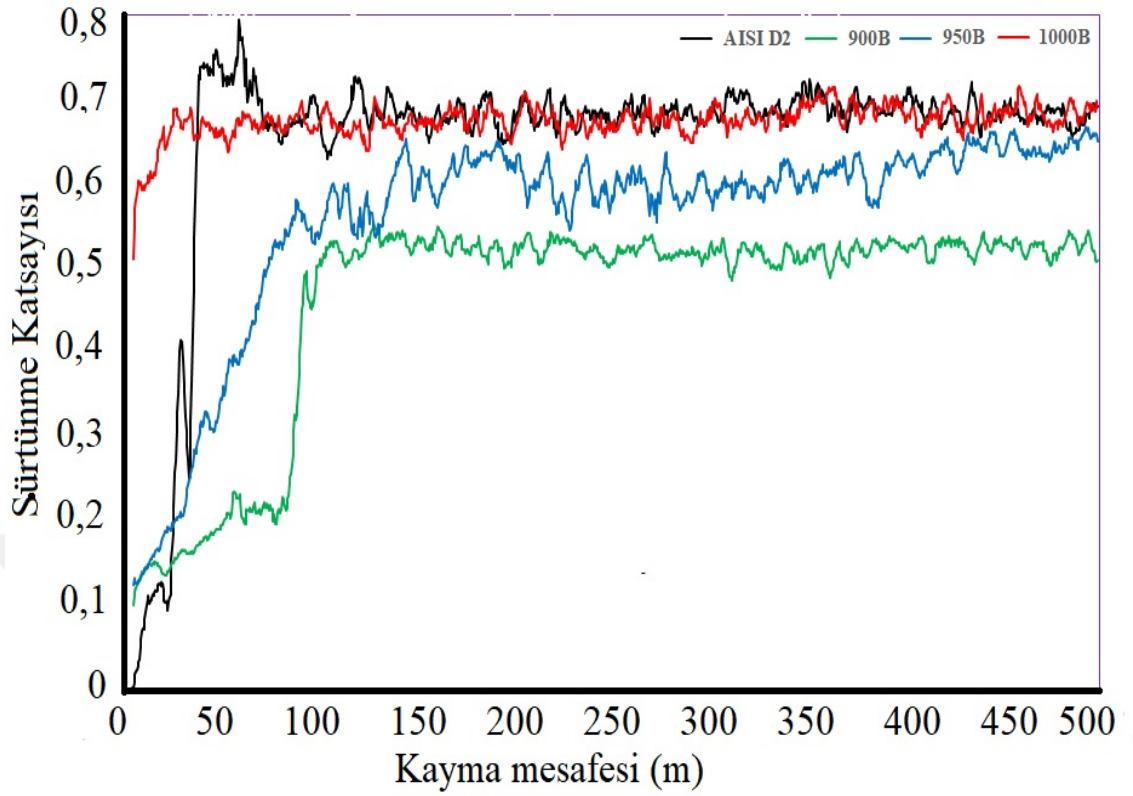
4.5.Aşınma Testi Sonuçları

900 °C, 950 °C ve 1000 °C'de 4 saat süreyle borlanan örneklerden elde edilen aşınma izi fotoğrafları Şekil 4.10'da verilmiştir. Örneklerin aşınma izi fotoğrafları incelendiğinde işlemsiz AISI D2 soğuk iş takım çeliği yüzeyinde daha derin bir aşınma bandı oluşturduğu görülmektedir (Şekil 4.10a). 900 °C 6 saat süreyle borlanan örnek yüzeyinin plastik deformasyona bağlı olarak pürüzlü yüzeylerin pürüzsüz bir hale geldiği ve yüzeyden kalkan parçaların yüzeye sıvandığı görülmektedir (Şekil 4.10b). 950 °C de borlanan örnek yüzeyinde 900 °C'ye göre nispeten daha pürüzlü bir morfoloji gözlenmektedir (Şekil 4.10c). 1000 °C'de borlanan örnekte ise soğuk iş takım çeliğine nazaran daha az pürüzlü bir yapı gözlenmede diğer iki kaplama örneğine göre daha derin ve pürüzlü bir morfoloji gözlenmiştir (Şekil 4. 10d).



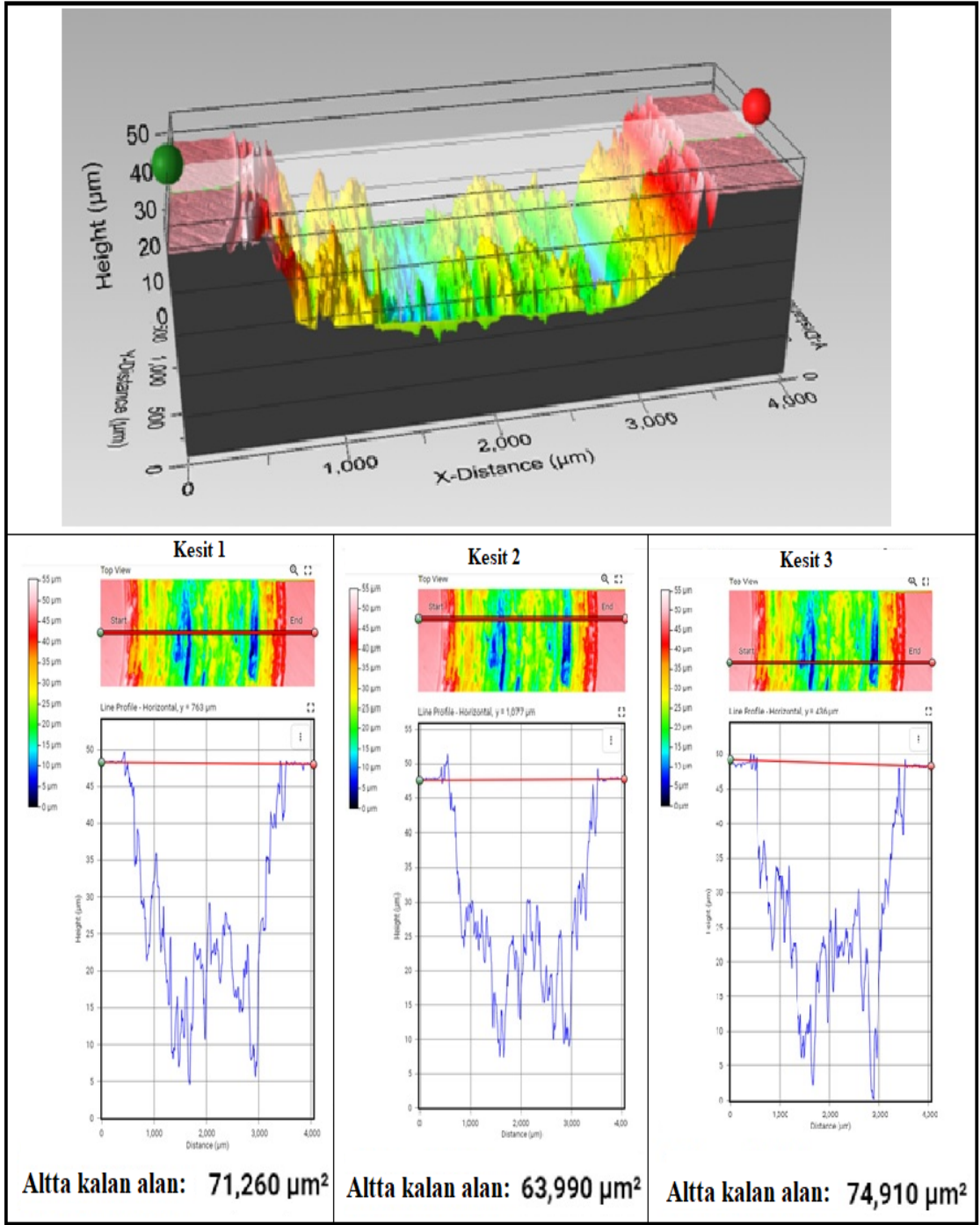
Şekil 4.10. Örneklerin aşınma izi fotoğrafları işlemsiz (a), 900 °C (b), 950 °C (c), 1000 °C (d)

500 m kayma mesafesi için 900 °C, 950 °C ve 1000 °C 'de borlanan ve işlemsiz AISI D2 çekme çenesi örneğinin sürtünme katsayısı davranışı Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Tüm örneklerde aşınma testinin başlamasıyla sürtünme katsayısı değerleri ani bir artış gösterdiği ve sonrasında ortalama bir dengeye ulaştığı görülmüştür. Başlangıç aşamasındaki temas alanı ve temas basıncının yüksek olmasıyla bu durum açıklanabilir [40]. Başlangıçta pürüzlü yüzeyler ile çelik bilya arasında bir temas olacağından temas basıncının yüksek olması beklenir. Bu da başlangıçta sürtünme katsayısının aniden artışına sebep olacaktır. Ancak zamanla pürüzlü yüzeylerin azalmasıyla temas yüzeyi artacak ve temas basıncı azalarak sürtünme katsayıları ortalama sabit bir değere gelecektir. Şekil 4.11 incelendiğinde işlemsiz AISI D2 ve 1000 °C'de 6 saat süreyle borlanan örneklerin sürtünme katsayılarının bir müddet sonra benzer değerlere geldiği görülmektedir. 900 °C'de borlanan örnekte sürtünme katsayısı en az olmuş ve sonrasında 950 °C'de borlanan örnekte bu değer bir miktar artmıştır. Şekil 4.10'da görülen yüzey morfolojilerine bakıldığında 1000 °C'de 6 saat süreyle borlanan örnek yüzeyinin diğer kaplanmış örneklerle göre daha pürüzlü olmasıyla bu durum açıklanabilir.

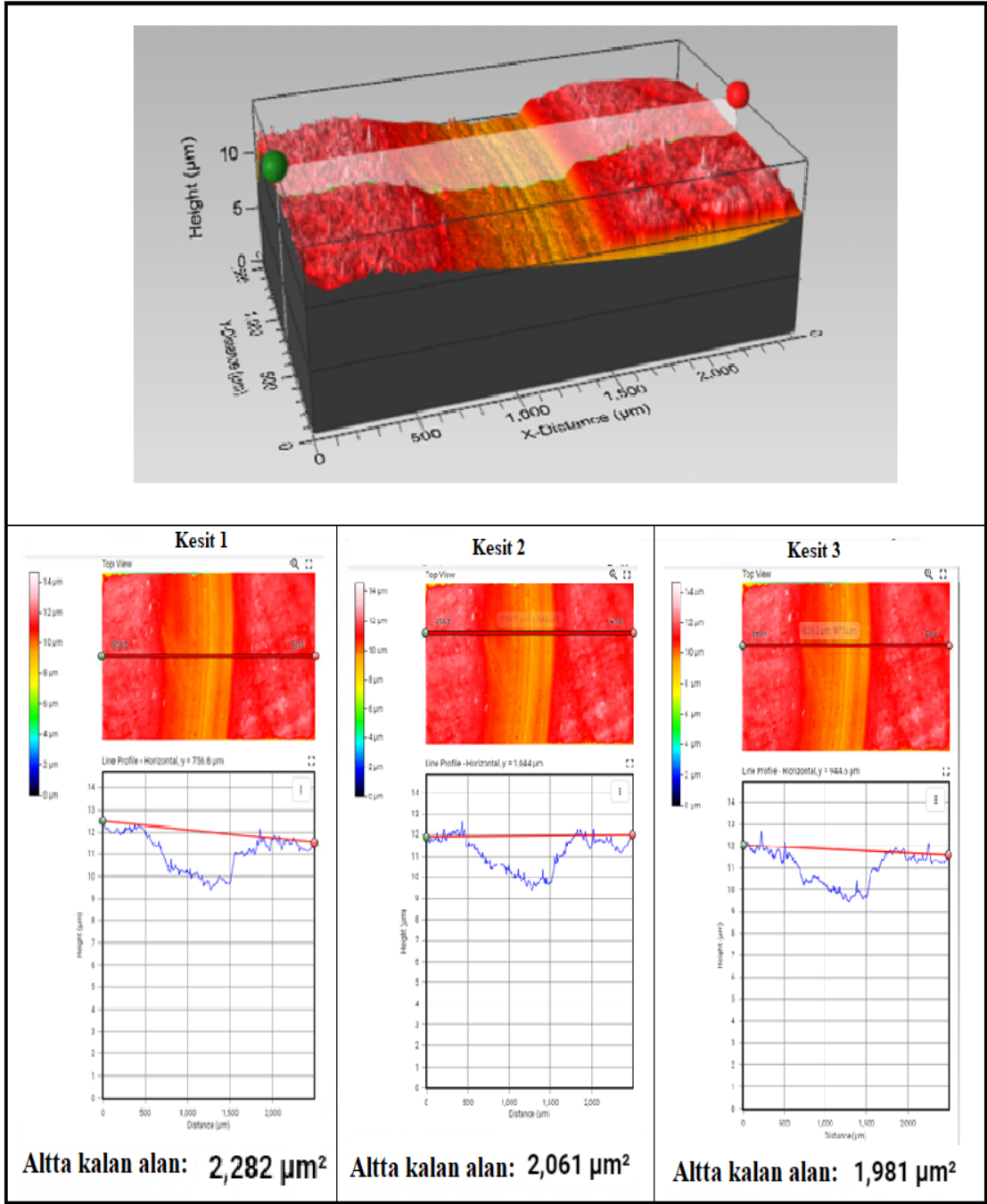


Şekil 4.11. 500 m kayma mesafesi için 900 °C, 950 °C ve 1000 °C ‘de borlanan ve işlemsiz AISI D2 çekme çenesi örneğinin sürtünme katsayısı davranışı

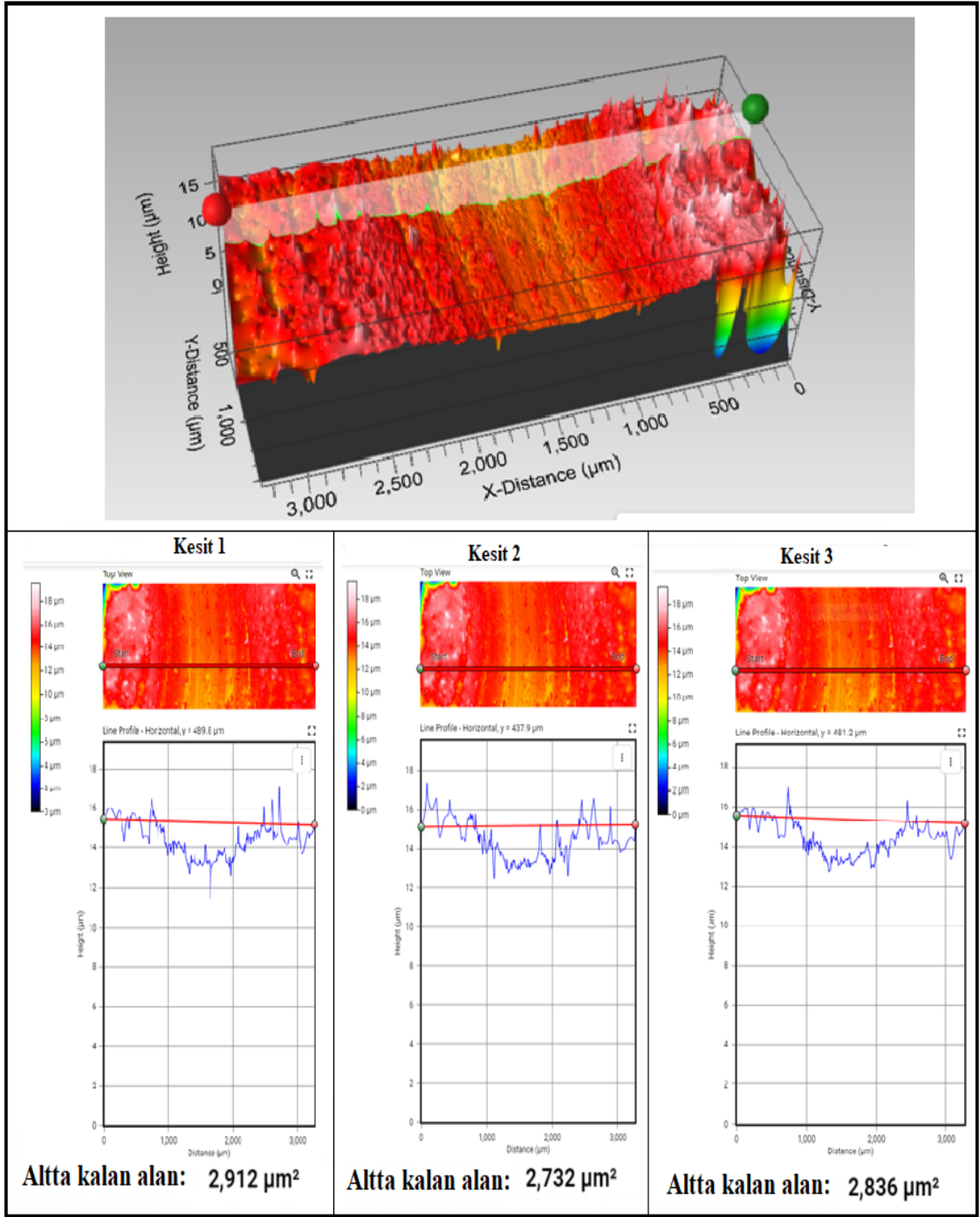
Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’te sırasıyla İşlemsiz, 900 °C, 950 °C ve 1000 °C’de 6 saat süreyle borlanan AISI D2 soğuk iş takım çeliği çekme çenelerinin aşınma yüzeyi 3D Profilometre görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.12’de görülen işlemsiz örneğin aşınma bandı derinliği ve genişliğinin diğer örneklere nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Üç farklı kesitten alınan hacimsel kayıplara bakıldığında en fazla kaybın işlemsiz AISI D2 soğuk iş takım çeliği çekme çenesi örneğinde gözlemlendiği görülmektedir. Şekil 4.13’te gösterilen 900 °C’de 6 saat süreyle borlanan AISI D2 soğuk iş takım çeliği çekme çenesi örneği incelendiğinde aşınma bandı derinliği ve genişliğinin diğer örneklere göre en düşük değerlerde olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 4.14’te gösterilen 950 °C’de 6 saat süreyle borlanan örnekte ise aşınma bandı derinliği ve genişliğinin 900 °C’deki örneğe göre bir miktar daha geniş ve derin olduğu ancak Şekil 4.15’te gösterilen 1000 °C’de 6 saat süreyle borlanan örneğe göre daha düşük değerlere sahip olduğu açıkça görülmektedir.



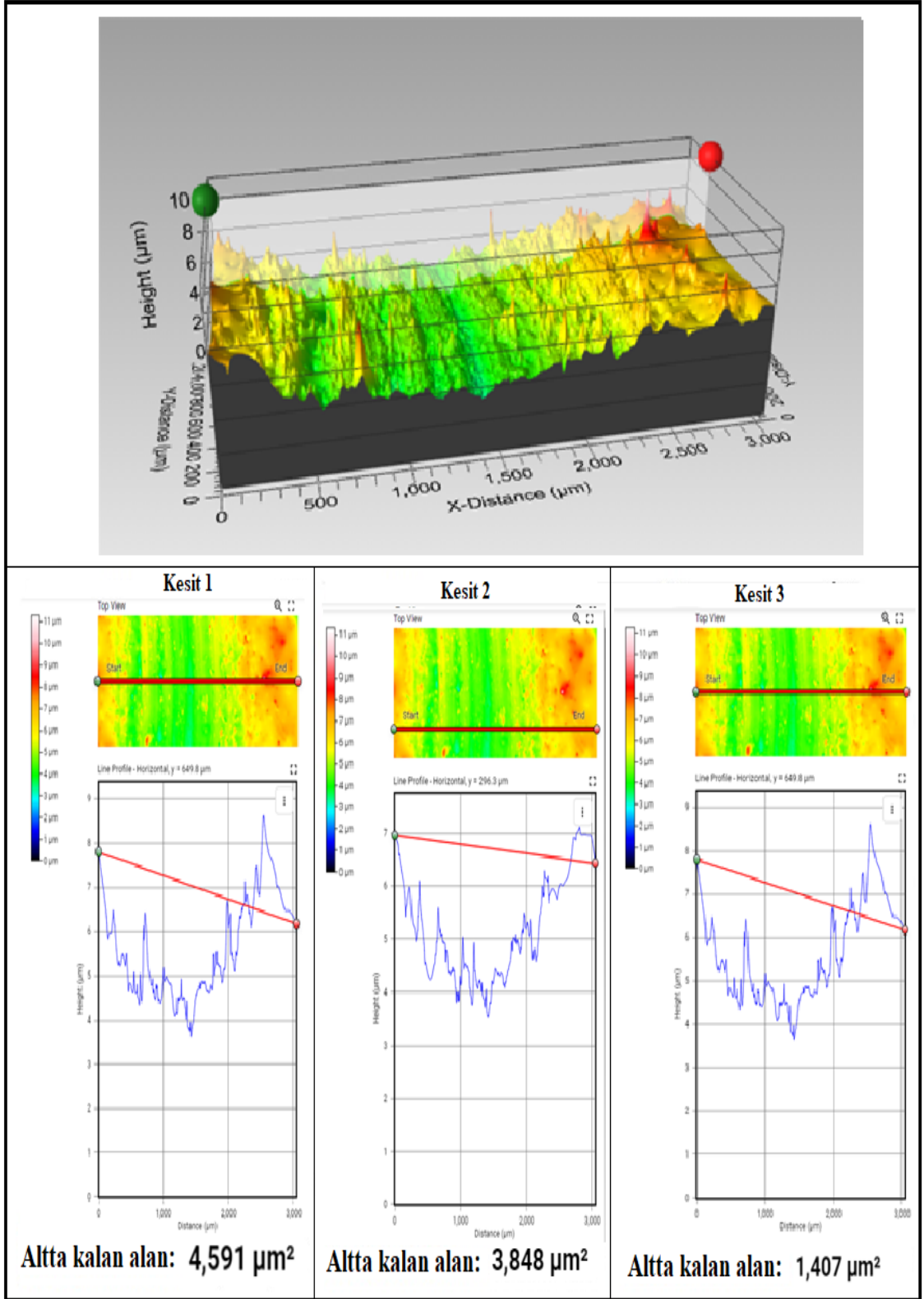
Şekil 4.12. İşlemsiz AISI D2 soğuk iş takım çeliği çekme çenesi örneğinden alınan aşınma bandı 3d profilometre analizi



Şekil 4.13. 900 °C’de 6 saat süreyle borlanan AISI D2 soğuk iş takım çeliği çekme çenesi örneğinden alınan aşınma bandı 3d profilometre analizi



Şekil 4.14. 950 °C'de 6 saat süreyle borlanan AISI D2 soğuk iş takım çeliği çekme çenesi örneğinden alınan aşınma bandı 3d profilometre analizi

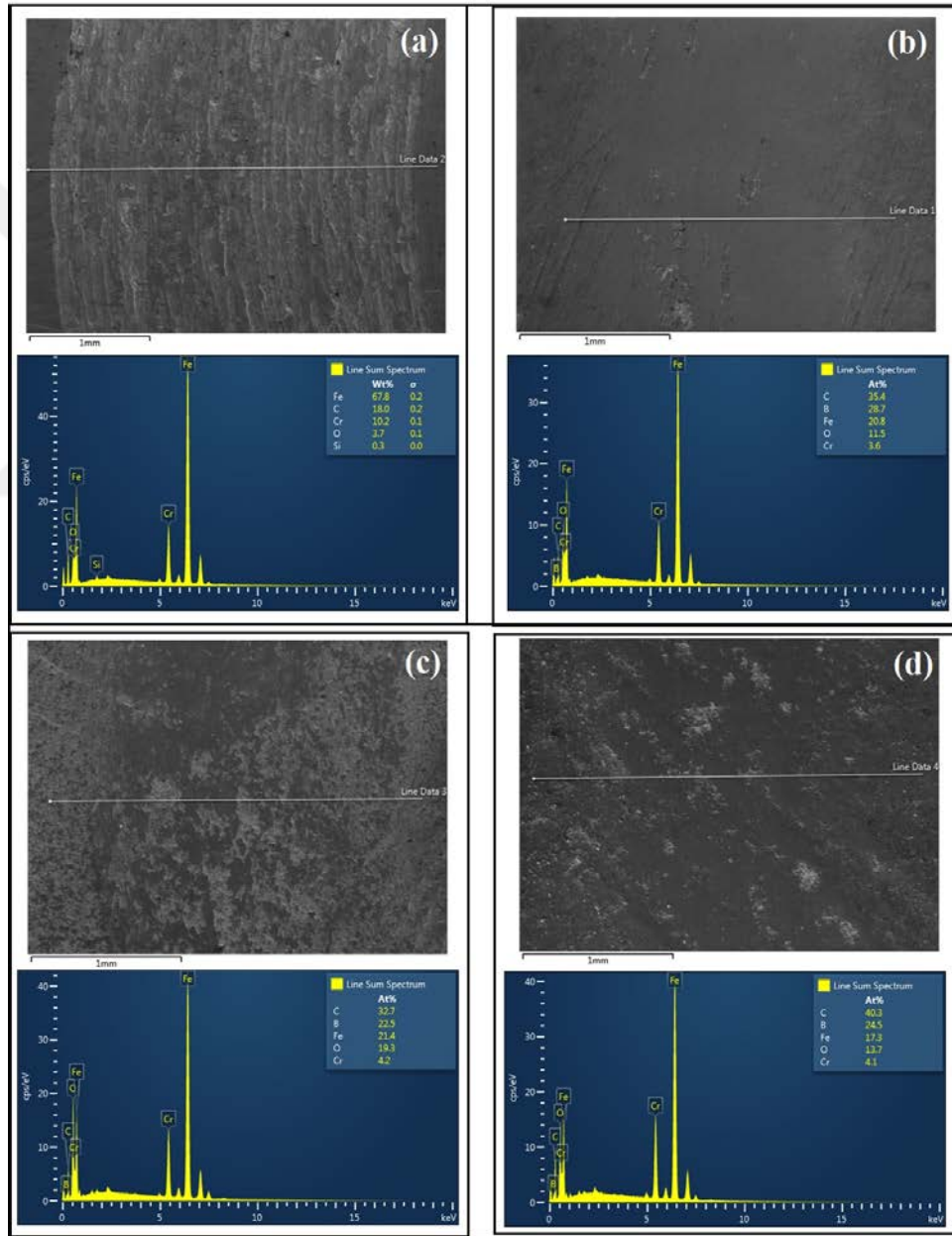


Şekil 4.15. 1000 °C'de 6 saat süreyle borlanan AISI D2 soğuk iş takım çeliği çekme çenesi örneğinden alınan aşınma bandı 3d profilometre analizi

Tablo 4.4'te bu çalışmada kullanılan tüm örneklerden elde edilen aşınma testi sonuçları özetlenmiştir. İşlemsiz AISI D2 soğuk iş takım çeliği çekme çenesi örneğinde borlanan örnekler göre daha yüksek aşınma gözlenmiştir. Ortalama hacim kayıpları işlemsiz örnekte $3,29 \text{ mm}^3 \cdot 10^{-3}$ seviyelerinde iken $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 6 saat süreyle borlanan örnekte bu değer $0,09 \text{ mm}^3 \cdot 10^{-3}$ seviyelerine kadar gerilemiştir. $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ve $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de borlanan örneklerde hacim kayıpları sırasıyla $0,12 \text{ mm}^3 \cdot 10^{-3}$ ve $0,14 \text{ mm}^3 \cdot 10^{-3}$ seviyelerinde gerçekleşmiştir. Bu da borlamanın çekme çenelerindeki aşınma etkisini ortaya koyan önemli bir faktördür. Dolayısıyla borlama yöntemi kullanılarak soğuk iş takım çeliği çekme çenelerinin aşınma davranışlarının azımsanamayacak ölçüde iyileştirildiği görülmektedir. Sürtünme katsayıları incelendiğinde işlemsiz ve $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de borlanan örneklerin benzer sürtünme katsayılarına sahip oldukları ve en düşük sürtünme katsayısının $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de borlanan örnek yüzeyinde ölçüldüğü görülmektedir. Şekil 4.10d ve Şekil 4.15 incelendiğinde $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de borlanan örneklerde farklı kesitlerden alınan hacim kayıplarının birbirinden 3-4 kata farklı olduğu ve aşınma mikroyapılarından da aşınma yüzeyinin diğer kaplanmış olan malzemelere göre daha pürüzlü bir yapıda olduğu görülebilmektedir. Borlama sonucunda altlık yüzeyinde Fe_2B ve FeB şeklinde farklı özelliklerde iki borür tabakası oluşmaktadır. Bu tabakalardan yüzeye yakın bölgede oluşan FeB tabakası diğerine nazaran daha serttir fakat gevrek yapıdadır. FeB tabakasının gevrekliği çelik malzeme ve Fe_2B borür tabakasından daha yüksek ısıl genleşme katsayısına sahip olması bu tabakada çatlak oluşma riskini arttırmaktadır[38]. Dolayısıyla $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de borlanan örneğin yüzeyinde en kalın FeB tabakası elde edilmiştir ve aşınma sonucunda yüzeyde oluşan bu pürüzlü ve sert yapı sürtünme katsayısının diğer örnekler nazaran yüksek değerlere sahip olmasına sebep olurken hacim kayıplarının işlemsiz örneğe göre daha düşük kalmasına sebep olmuştur. Ayrıca Şekil 4.16'daki aşınma yüzeylerinden alınan EDS analizleri incelendiğinde 500 m test sonunda $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ve $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de borlanan örneklerin yüzeydeki pürüzlü yapıların plastik deformasyona bağlı olarak pürüzsüz bir hale geldiği görülebilir. Bunun yanında aşınma testi sırasında yüzeyden kaldırılan parçaların yeniden yüzeye sıvanmış olduğu da görülmektedir. Aşınma testi sırasında plastik deformasyon sonucu meydana gelen sıcaklık artışlarına bağlı olarak özellikle $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ve $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de borlanan örneklerin yüzeyinde yüksek oranda oksidasyon meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.16 b ve c).

Tablo 4.4. Örneklerden elde edilen aşınma testi sonuçları

Örnek	Hacim Kaybı $\text{mm}^3 \cdot 10^{-3}$	Sürtünme Katsayısı 500m	Aşınma Oranı ($\text{mm}^3/\text{Nm} \cdot 10^{-7}$)
İşlemsiz	3.29	0.70	4.4
900 °C	0.09	0.52	1.0
950 °C	0.12	0.62	2.0
1000 °C	0.14	0.70	2.0



Şekil 4.16. Aşınma sonucu numunelerin EDS analizi sonuçları

BÖLÜM 5

TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada tel çekme işleminde kullanılan X210Cr12 soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiş çektirme çenelerinin termokimyasal difüzyon yöntemi ile borlanabilirliği ve borlamanın çekme çenelerinin üzerindeki etkileri araştırılmıştır ve şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- 900 °C, 950 °C ve 1000 °C’de 4 saat süreyle borlama sonucu yüzeylerde homojen ve 35-65 mikron kalınlığında FeB ve Fe₂B ‘den oluşan çift katmanlı bir yapı elde edilmiştir.
- Dişli kısımlarda kaplama kalınlıkları 15-34 mikron daha fazla oluşmuştur. Dişli kısımların yüzey alanının daha geniş olması difüzyon miktarını arttırmıştır.
- Kaplama sıcaklıklarının artışı kaplama kalınlıklarını arttırmıştır. Bu da malzemenin aşınma özellikleri ve morfolojisi üzerinde önemli etkilere neden olmuştur.
- Borlama sonucunda sertlik değerleri yüzeyde 2000-2500 Hv aralığında yükselmiştir.
- Kırılma tokluğu ortalama değerleri borlama sıcaklığının artmasıyla bir miktar artsa da birbirine yakın değerler elde edilmiştir.
- İşlemsiz numuneler borlanmış numunelere oranla daha yüksek aşınma göstermiştir. FeB ile Fe₂B’un termal genleşme katsayılarının ve termal iletkenliklerinin farklı olması dolayısıyla kaplama kalınlıklarını artmasıyla sürtünme katsayıları artmıştır. En düşük sürtünme katsıısı değeri 900°C’de 4 süreyle borlanan örneklerde elde edilmiş ve bu örneklerde hacimsel kayıplar en az olmuştur.

KAYNAKLAR

1. Abakay, E., Termo-Reaktif difüzyon (TRD) yöntemi ile çeliklerin Nb-Al-N kaplanması. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2013.
2. Arai, T., Thermoreactive Deposition/Diffusion Process for Surface Hardening of Steels, ASM Metals Handbook Vol 4: Heat Treating, ASM International, 1000-1004, 1991.
3. Thomas Maxwell, (1989), Technical Paper, Die Design Coupled With Modern Finishing Techniques
4. Deniz, G., "Termo-reaktif difüzyon (TRD) tekniği ile AISI 1010 ve AISI M2 çeliklerinin Titanyum Nitrit (TiN) kaplanması", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, S.1-60, Sakarya, 2004
5. Koçaslan, A., "16MnCr5 Çeliğinin Borlama Ve Termal Çevrimli Borlama Özelliklerinin Araştırılması", Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2016.
6. Akca, B., "Saf Molibdenin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi", Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği, Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2015
7. Aksoy, C., Kaftanoğlu, B., Tel çekme işleminin bilgisayar yardımı ile modellenmesi. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 2: (1): 18-26.
8. Bodur, H., 1975. Metallere Plastik Şekil Verme Usulleri, Arpaz Matbaası, Birsen Kitabevi Yayınları İstanbul.

9. Smith, W. F., "Malzeme Bilimi ve Mühendisliği", Literatür Yayıncılık, Çeviri Nihat G. Kınıkoğlu, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 451-547 (2001).
10. ASM Handbook Volume 1, Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys, Desk Edition, Ohio, 2002.
11. Arslan, F. K., "Soğuk iş takım çeliklerinde sıfırlı işlem derecesinin mekanik özelliklere etkisi," Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, S.1-59, Sakarya, 2010.
12. ASM International Handbook Committee, (1990), ASM Handbook Volume 1 Properties and Selection: Iron Steel and High Performance Alloys, ASM International, Ohio.
13. Arslan, Y., "Kronolojik AISI D3 soğuk iş takım çeliğinin performansına etkilerinin incelenmesi", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, S.1-46, Ankara, 2014.
14. Dalar, A., "Borlanmış Dişli Çeliklerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
15. Nişli, G., "Bortemperlenmiş AISI 1040 Çeliğinin Yüzey Özelliklerinin ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
16. Aydemir, T., Şen, U. Borlanmış soğuk iş takım çeliklerinin aşınma davranışları. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. 2003, 7(3), 28-31.
17. Özsoy, A., 2001. Borlama ile İlgili Genel Bir Değerlendirme. Endüstriyel Yüzey Teknolojileri Dergisi, 22, 10-13.

18. Üçkardeşler, A., "Çelik Dökümlerde Borlama Isıl İşleminin Abrasif Aşınma Direnci Üzerine Etkisi", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2013).
19. Ünüvar,F., "Saf Kobaltın Borlama Özelliklerinin İncelenmesi", Süleyman Demirel Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü,Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi ,2013.
20. M. Tabur, "Bor Karbür Kaplanmış AISI 8620 Ve Hardox 400 Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi," Gazi Üniversitesi, 2008.
21. Sinha, A.K., 1991. Boriding (Boronizing), ASM Handbook, J. Heat Treating, OH, USA., 4, 437-447.
22. Matuschka, A.G., 1980. Boronising, Carl Hanser Verlag, München.
23. Sarı, M., "Sementasyon Çeliğinin Kutu Borlama Yöntemiyle Kaplanması Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2019).
24. Yapar, Taştan., 2002. Çeliklerde Borlama Yoluyla Yüzey Sertleştirme, Metal Dünyası, 115, 69-74.
25. Kanat, S., "Borlanmış AISI D6 Çeliğinin Karakterizasyonu ve Aşınma Davranışının İncelenmesi", Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2015).
26. ER Ü, Par B., 2004 Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi C.XVII, S.1, 2004.
27. Kayalı, Y., "Borlanmış AISI 316 L Paslanmaz Çeliğin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2011).

28. Sinha, A. K. Boriding (Boronizing). ASM Handbook, ASM International. Materials Park, Ohio, USA, 1991, 4, 437–447.
29. Ozbek, I., Bindal, C. Mechanical properties of boronized AISI W4 steel. Surface and Coatings Technology. 2002, 154, 14–20.
30. Davis, J. R. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics. ASM International. Materials Park, Ohio, USA, 2002.
31. Sarı, M., "Sementasyon Çeliğinin Kutu Borlama Yöntemiyle Kaplanması Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2019).
32. Akca, B., "Saf Molibdenin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi", Süleyman Demirel Üniversitesi ,Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği, Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
33. Bayça, S.U. ve Şahin, .S (2004) Borlama. Mühendis ve Makine, 532:51-59.
34. Akbayır, Ö., "Katı Ortamda Borlanmış AISI 1030 Çeliğinde İşlem Parametrelerinin Yüzey ve Aşınma Özelliklerine Etkisi", Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2005).
35. Erarslan, R., "Bilyeli Öğütme ve Kutu Borlama Yöntemleri ile AISI 1018 Çelik Yüzeyinin Kaplanması ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, (2023).
36. M. Kulka, N. Makuch, A. Piasecki, Nanomechanical characterization and fracture toughness of FeB and Fe₂B iron borides produced by gas boriding of Armco iron, Surf. Coat. Technol. 325 (2017) 515–532.

37. Gunen, A., Gok, M.S., Erdogan, A., Kurt, B., Orhan, N., Investigation of Microabrasion Wear Behavior of Boronized Stainless Steel with Nanoboron Powders, Tribology Transactions, 56: 400-409, 2013.
38. Kutucu Y. K., Yüksek Alaşımli Çeliklerin Borlanması Sonucunda Oluşan Isıl Artık Gerilmelerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Anabilim Dalı, Temmuz, 2013.
39. C.S. Barret, T.B. Massalski, Pergamon Press, Oxford, UK, 1980.
40. Açıkgöz H.H., AISI D3 Soğuk İş Takım Çeliği Yüzeyinde Niyobyum Karbür Kaplamalarının Oluşturulabilirliği, Aşınma ve Korozyon Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı İskenderun Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2023.