

Tungsten Karbür Kesici Takımların Borlanması ve Karakterizasyonu

Tuna Aydoğmuş

DOKTORA TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Mart 2019

Boronizing and Characterization of Tungsten Carbide Cutting Tools

Tuna Aydoğmuş

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Physics

March 2019

Tungsten Karbür Kesici Takımların Borlanması ve Karakterizasyonu

Tuna Aydoğmuş

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Derya PEKER

Mart 2019

ONAY

Fizik Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Tuna AYDOĞMUŞ'un DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Tungsten Karbür Kesici Takımların Borlanması ve Karakterizasyonu" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Derya PEKER

İkinci Danışman : -

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Derya PEKER

Üye : Doç. Dr. Salih KÖSE

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Polat TOPUZ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÖZKAN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Sema KURTARAN

<p>Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.</p> <p style="text-align: right;">Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN Enstitü Müdürü</p>
--

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım klavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Derya PEKER danışmanlığında hazırlamış olduğum “Tungsten Karbür Kesici Takımların Borlanması ve Karakterizasyonu” başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 15/03/2019

Tuna AYDOĞMUŞ

ÖZET

Tungsten Karbür (WC) günümüzde, kesici takımlarda, sondaj ve tünel açma makinelerinin kazma-delme başlıklarında elmas yerine kullanılmaktadır. Her ne kadar ismi Tungsten karbür olsa da içerisinde belli oranlarda Kobalt (Co) ihtiva etmektedir. Kobalt miktarı arttıkça, aşınma dayanımı da artmaktadır. WC-Co malzemesi, toz metalürjisi yöntemiyle elde edilebilmektedir. Tungsten karbür tozları ile kobalt tozlarının belli oranda karıştırılması ile elde edilmektedir. Bu çalışmada, WC-Co' dan üretilmiş, özellikle sondaj açmada kullanılan makinelerde aşındırıcı olarak kullanılan uçların borlanma özellikleri incelenmiştir. %90 WC ve %10 Co içeren uçlar, 1, 2 ve 3 saat süre ile 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C'de borlanmıştır.

Borlanma işlemleri tamamlanan numunelerin SEM (Tarama Elektron Mikroskobu) ve optik mikroskop ile mikroyapı incelemeleri, borür tabakası kalınlık ölçümleri, sertlik ölçümleri, kırılma tokluğu ölçümleri, EDS ve XRD analizleri ve son olarak da aşınma testleri gerçekleştirilmiş, literatür ile karşılaştırılmaları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tungsten Karbür, Kobalt, Toz Metalürjisi, Aşındırıcı Uç, Borlama

SUMMARY

Today, Tungsten Carbide (WC) is used in place of diamonds for cutting tools, heads of drilling and tunneling machines for digging and drilling. Although its name is Tungsten carbide, it contains Cobalt (Co) in certain proportions. As the amount of cobalt increases, the wear resistance increases. WC-Co material can be obtained by powder metallurgy method. It is obtained by mixing tungsten carbide powders and cobalt powders in a certain ratio. In this study, the boronizing properties of the inserts used in WC-Co machines, which are used in drilling machines, are investigated. The inserts containing 90% WC and 10% Co were boronized at 900 °C, 1000 °C and 1100 °C for 1, 2 and 3 hours.

The samples which have completed the boronizing process, microstructure studies by SEM (Scanning Electron Microscope) and optical microscope, boride layer thickness measurements, hardness measurements, fracture toughness measurements, EDS and XRD analyzes and finally friction tests were performed and compared with the literature.

Keywords: Tungsten Carbide, Cobalt, Powder Metallurgy, Abrasive Insert, Boronizing

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarım süresince, tüm bilgi ve tecrübesiyle her anlamda yanımda olan ve bana yol gösteren danışmanım, çok kıymetli hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Derya PEKER'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımda benimle birlikte vakit harcayan ve ilgisini hiç eksik etmeyen çok kıymetli hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Polat TOPUZ'a teşekkür ederim.

Her zaman bana destek olan, beni büyütüp yetiştiren Sevgili Annem Tülay AYDOĞMUŞ ve Rahmetli Babam Mehmet AYDOĞMUŞ'a; bana her zaman destek ve yardımcı olan canımdan çok sevdiğim Sevgili Kardeşim Fatma AYDOĞMUŞ'a sonsuz teşekkür ederim.

Varlığı ve gücü ile beni daima destekleyen, her zorlukta yanımda olan çok kıymetli hayat arkadaşım Sevgili Dilek AYDOĞMUŞ'a ve hayatıma renk getiren, motivasyon kaynağım olan kızım Dolunay Tülay AYDOĞMUŞ'a sonsuz teşekkür ederim.

Tuna AYDOĞMUŞ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. BORLAMA	5
2.1. Borlu Tabakaların Özellikleri.....	6
2.1.1. Borlama ile aşınma direncini artırma.....	6
2.1.2. Borlama ile korozyon direncini artırma.....	6
2.1.3. Borlama ile yorulma direncini artırma.....	7
2.2. Borlama Yöntemleri.....	7
2.2.1. Katı borlama.....	8
2.2.1.1. <u>Kutu borlama</u>	8
2.2.1.2. <u>Akışkan yatakta borlama</u>	10
2.2.1.3. <u>Pasta borlama</u>	11
2.2.2. Sıvı borlama.....	11
2.2.2.1. <u>Elektrolitik sıvı borlama</u>	12
2.2.2.2. <u>Elektrolitik olmayan sıvı borlama</u>	13
2.2.3. Gaz borlama.....	14
2.2.4. Plazma borlama.....	15
2.2.5. Çok bileşenli borlama.....	16
2.3. Borlamada Kullanılan Isıl İşlem Fırınları.....	18
2.3.1. Atmosfer kontrollü fırınlar.....	18
2.3.2. Vakumlu fırınlar.....	19

İÇİNDEKİLER(devam)

Sayfa

2.3.3. Akışkan yataklı fırınlar.....	20
2.4. Metalik Malzemelerin İçerisindeki Alaşım Elementlerinin Borlama İşlemine Etkisi.....	21
2.5. Borlanabilen Malzemeler ve Oluşan Borürler.....	22
2.5.1. Tungsten karbürün borlanması sonucu oluşan borür fazları ve özellikleri.....	27
2.5.2. Tungsten (Wolfram).....	27
2.5.3. Tungsten karbür (WC).....	28
2.5.4. Tungsten karbür sert metal üretimi.....	29
2.5.5. Kobalt (Co).....	30
2.5.6. Tungsten karbür-kobalt (WC-Co).....	32
2.5.7. Kesici veya aşındırıcı olarak WC-Co.....	32
2.5.8. Tünel açma ve delme makinelerinde WC-Co'ın önemi.....	33
2.6. Borlama Kinetiği.....	34
2.6.1. Yayınım (Difüzyon).....	34
2.6.2. Yayınım (Difüzyon) sistemleri.....	35
2.6.2.1. <u>Yayınım türleri</u>	35
2.6.2.2. <u>Yayınım da aktivasyon enerjisi (Q)</u>	38
2.6.2.3. <u>Difüzyon hızı (J)</u>	39
2.6.2.4. <u>Difüzyon katsayısı (D)</u>	40
2.6.2.5. <u>Difüzyon mesafesi (x)</u>	40
2.6.2.6. <u>Kırılma tokluğu</u>	43
3. MATERYAL VE YÖNTEM	48
3.1. Deneyleerde Kullanılan Malzeme Ve Cihazlar.....	48
3.2. Deneyleerde Kullanılan Fırının Özellikleri.....	54
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	55
4.1. Borlama İşlemi Sonucu Oluşan Tabakaların Mikroyapı İncelemeleri.....	55
4.2. Borlanmış Numunelerin Sertlik Ölçümleri.....	67
4.3. Borlanmış Numunelerin Kırılma Tokluğu Ölçümleri.....	70

İÇİNDEKİLER(devam)**Sayfa**

4.4. Borlanmış Numunelerin Kinetik İncelemeleri.....	73
4.5. Borlanmış Numunelerin Aşınma Durumlarının İncelenmesi.....	76
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	81
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	84
ÖZGEÇMİŞ.....	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Bor elementi.....	1
1.2. Dünya bor üretimi yapan ülkeler.....	2
2.1. Kutu borlamanın şematik gösterimi.....	8
2.2. Dıştan rezistanlı akışkanlı yatak.....	10
2.3. Pasta borlama macunu.....	11
2.4. Elektrolitik sıvı borlama kabı.....	12
2.5. Elektrolitik olmayan sıvı borlama kabı.....	14
2.6. Gaz borlama ünitesi.....	15
2.7. Plazma borlama ünitesi.....	16
2.8. Isıl işlem fırını.....	18
2.9. Atmosfer kontrollü fırın.....	19
2.10. Vakumlu fırın.....	20
2.11. Akışkan yataklı fırın ve haznedeki akışkanlaşma durumu.....	20
2.12. Tungsten bor denge diyagramı.....	26
2.13. Tungsten (Wolfram).....	28
2.14. Tungsten karbür tozu.....	28
2.15. Tungsten karbür (çubuk şeklinde).....	29
2.16. Tungsten karbür sert metal üretimi.....	30
2.17. Kobalt.....	31
2.18. Tünel açma ve delmede kullanılan delme başlığı.....	34
2.19. Kendi kendine yayınım şematik gösterimi.....	35
2.20. Yüzey yayınımlı şematik gösterimi	36
2.21. Tane sınırı yayınımlı şematik gösterimi.....	36
2.22. Yeralan yayınımlı şematik gösterimi.....	37
2.23. Arayer yayınımlı şematik gösterimi.....	37
2.24. Halka yayınımlı şematik gösterimi.....	38
2.25. Aktivasyon enerjisinin difüzyon sistemindeki oluşumu şematik gösterimi.....	39

ŞEKİLLER DİZİNİ(devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.26. Difüzyon Mekanizması.....	40
2.27. Difüzyon mesafesi.....	42
2.28. Vickers setlik ölçüm gösterimi (şematik).....	46
2.29. Vickers ölçüm izi.....	46
3.1. Borlama deneylerinde kullanılan WC-Co düğme uç.....	48
3.2. WC-Co malzemenin literatürden mikroyapısı.....	49
3.3. Deneylerde kullanılan WC-Co'ın mikroyapısı.....	49
3.4. WC-Co Analiz sonucu.....	50
3.5. Borlanmış WC numuneler.....	50
3.6. Optik mikroskop ve bilgisayarı.....	51
3.7. Vickers sertlik ölçme cihazı.....	52
3.8. JEOL Marka JSM 5410 LV Tarama Elektron Mikroskobu ve EDX ünitesi.....	52
3.9. XRD cihazı.....	53
3.10. Isıl işlem fırını.....	54
4.1. Ortalama tabaka kalınlığının bulunması.....	55
4.2. 900 °C'de 1saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.....	56
4.3. 900 °C'de 2 saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.....	56
4.4. 900 °C'de 3 saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.....	57
4.5. 1000 °C'de 1 saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.....	57
4.6. 1000 °C'de 2 saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.....	58
4.7. 1000 °C'de 3saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.....	58
4.8. 1100 °C'de 1 saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.....	59
4.9. 1100 °C'de 2 saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.....	59
4.10. 1100 °C'de 3 saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.....	60
4.11. Borür tabakasının EDX yüzey harita resmi.....	61
4.12. 900 °C'de borlanmış numunelerin tabaka kalınlıkları.....	61
4.13. 1000 °C'de borlanmış numunelerin tabaka kalınlıkları.....	62
4.14. 1100 °C'de borlanmış numunelerin tabaka kalınlıkları.....	62

ŞEKİLLER DİZİNİ(devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.15. 900 °C’de 1saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi.....	63
4.16. 900 °C’de 2saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi.....	63
4.17. 900 °C’de 3saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi.....	64
4.18. 1000 °C’de 1saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi.....	64
4.19. 1000 °C’de 2saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi.....	65
4.20. 1000 °C’de 3saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi.....	65
4.21. 1100 °C’de 1saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi.....	66
4.22. 1100 °C’de 2saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi.....	66
4.23. 1100 °C’de 3saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi.....	67
4.24. 900 °C’de borlanmış numunelerin sertlik değerleri.....	69
4.25. 1000 °C’de borlanmış numunelerin sertlik değerleri.....	69
4.26. 1100 °C’de borlanmış numunelerin sertlik değerleri.....	70
4.27. 900 °C’de borlanmış numunelerin kırılma tokluk değerleri.....	72
4.28. 1000 °C’de borlanmış numunelerin kırılma tokluk değerleri.....	72
4.29. 1100 °C’de borlanmış numunelerin kırılma tokluk değerleri.....	73
4.30. 900 °C’de borlanmış numunelerin $x^2 - t$ diyagramı.....	74
4.31. 1000 °C’de borlanmış numunelerin $x^2 - t$ diyagramı.....	74
4.32. 1100 °C’de borlanmış numunelerin $x^2 - t$ diyagramı.....	73
4.33. Borlanmış WC-Co’ın $\ln K^{-1}/T$ diyagramı.....	75
4.34. Şematik Pin-On disk cihazı.....	77
4.35. 900 °C numunelerinin kütle kaybı.....	78
4.36. 900 °C numunelerinin kütle kaybı.....	79
4.37. 1100 °C numunelerinin kütle kaybı.....	80
4.38. Kalıplanmış numuneler.....	81

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Borlama işlemlerinde kullanılan Ekabor türleri ve özellikleri.....	9
2.2. Çok bileşenli borlama işlemine dair örnekler.....	17
2.3. Isıl işlem fırınlarının karşılaştırılması.....	21
2.4. Farklı malzemelerin borlanması ile oluşan borür fazları ve sertlikleri.....	24
2.5. Çeşitli borürlerin özellikleri.....	25
4.1. Numunelerin sertlik değişimleri.....	68
4.2. Numunelerin kırılma toklukları.....	71
4.3. Borlanmış WC numunelerin borür tabaka kalınlıklarının hesaplanması.....	74
4.4. Borlanmış WC numunelerinin kinetik hesaplarına ait değerler.....	74
4.5. 900 °C numunelerinin kütle kaybı.....	77
4.6. 1000 °C numunelerinin kütle kaybı.....	78
4.7. 1100 °C numunelerinin kütle kaybı.....	79

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
B	Bor
Å	Angstrom
°C	Santigrad derece
HV	Vickers sertliği
gr	Gram
N	Newton
Fe	Demir
C	Karbon
Si	Silisyum
Al	Alüminyum
Cr	Krom
Ni	Nikel
Mn	Mangan
V	Vanadyum
W	Tungsten
Mo	Molibden
WC	Tungsten Karbür
Co	Kobalt
WC-Co	Tungsten Karbür-Kobalt
Q	Aktivasyon enerjisi
J	Difüzyon hızı
D	Difüzyon katsayısı
T	Zaman

1. GİRİŞ VE AMAÇ

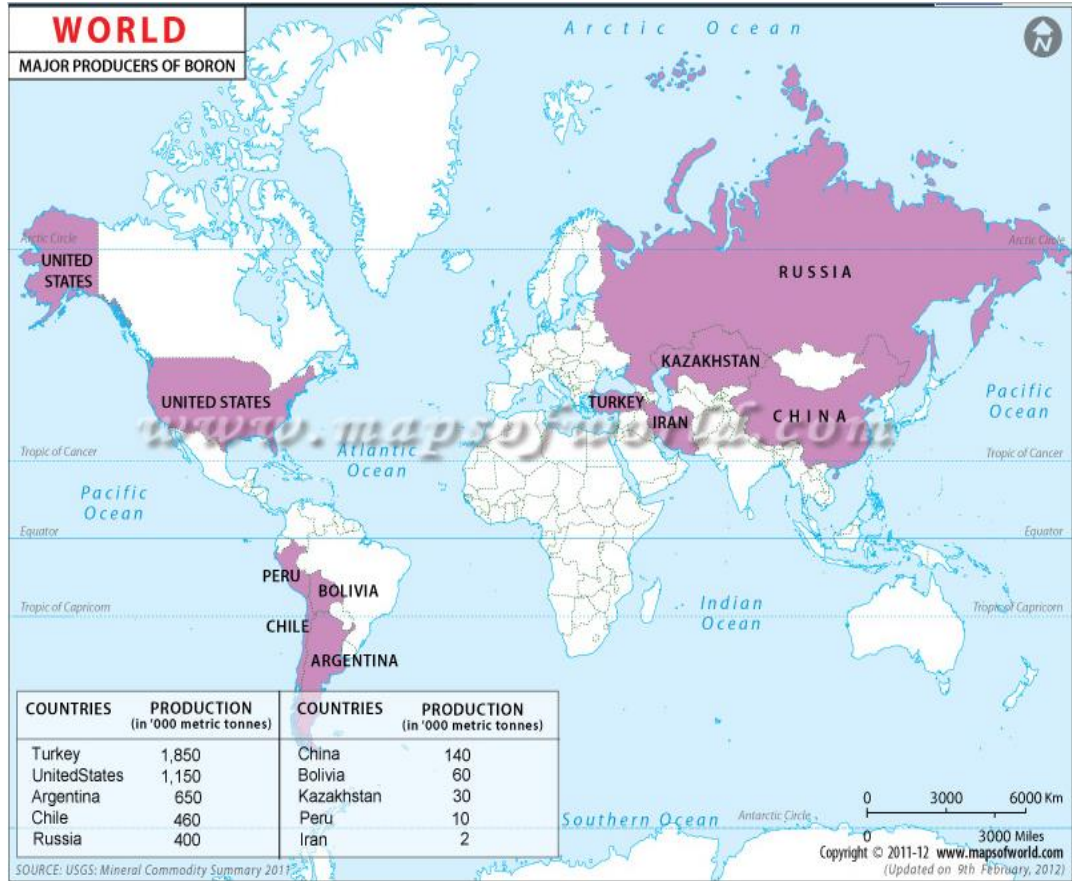
Bor, önemli bir endüstriyel kimyasal elementtir. Tarihin yazılmasından bu yana insanlar, bor ihtiva eden bileşikleri kullanmışlardır. Fakat 19. YY başlarına kadar bu element tek başına keşfedilememiştir. Bilim adamları saf boru metalik veya yarı metal olarak tanımlamışlardır. Parlaklığı ve sertliği açısından metale benzemesine rağmen elektrik iletimi zayıf bir elementtir. Bor, başka elementler ile bileşik oluşturabilmektedir. Pek çok bileşiği, atomlarının zincir veya halka şeklinde birleşmesinden dolayı kullanılamamaktadır. Kimyasal sembolü B, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81, atom yarıçapı 0,98 Å, ergime sıcaklığı 2300 °C, kaynama sıcaklığı 2550 °C olan ve periyodik tablonun III A grubunda yer alan geçiş elementidir (Beatty, 2006).



Şekil 1.1 Bor elementi

Bor, biri amorf ve altısı kristalin polimorf olmak üzere, çeşitli allotropik formlarda bulunur. Alfa ve beta rombohedral formlar en çok çalışılmış olan kristalin polimorflarıdır. Alfa rombohedral strüktür 1200 °C'nin üzerinde bozulur ve 1500 °C'de beta rombohedral form oluşur. Amorf form yaklaşık 1000 °C'nin üzerinde beta rombohedrale dönüşür ve her türlü saf bor ergime noktasının üzerinde ısıtılıp tekrar kristalleştirildiğinde beta rombohedral forma dönüşür. Bor, yerkabuğunda yaygın olarak bulunan 51. elementtir. Bor tabiatta hiçbir zaman serbest halde bulunmaz. Doğada yaklaşık 230 çeşit bor minerali olduğu bilinmektedir. Yaygın olarak bulunan bor minerallerinden bir tanesi bir tür

aluminoborosilikat minerali olan ve yapısında %10'a kadar bor içerebilen Turmalin'dir. Ancak, sanayide alkali ve toprak alkali bor mineralleri olan tinkal ($\text{Na}_4\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), kernit ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ve üleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) kullanılmaktadır. Ticari maden yatakları sınırlı olup en çok Türkiye ve ABD'de bulunmaktadır (<http://www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-elementi>, 2017).



Şekil 1.2 Dünya bor üretimi yapan ülkeler

Safılık derecesi yüksek (99,99%) kristalize Bor, elektronik yapı elemanları ve yarı iletkenlerde kullanılır. Yine kristalize borun tel şeklindeki kristalleri uçak sanayi ve uzay taşıtlarında bulunan sentetik malzemelerde ve hafif madenlerde (alaşım) elyaf kuvvetlendiricisi olarak kullanılmaktadır. Amorf Bor havai fişeklerin karışımında veya katı roket yakıtlarında katkı maddesi olarak kullanılır. Demirle alaşımı sonucu sertlik derecesi çok yüksek çeliklerin imalatına olanak sağlar. Bu alaşımlar B10 izotopuyla beraber atom reaktörlerinde nötron absorbanı olarak da kullanılmaktadır. İzolasyon (yalıtım) ve ağartma malzemeleri imalatlarındaki kullanımları nedeniyle bor bileşiklerinden Borik asit B_2O_3 ve Boraks $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ teknik açıdan önemlidirler.

Elementer Borun Kullanıldığı Önemli Uygulamalar:

- Roket yakıtlarında katkı maddesi,
- İnce taneli inşaat çeliğine alaşım ilavesi,
- Nükleer yakıtların muhafazası için kullanılan çeliğe katkı,
- Nikel esaslı alaşımlara katkı,
- Bakırın oksitlenmesini önlemek için katkı,
- Helikopter pervaneleri, tenis raketleri, golf sopası yapımında,
- Bombardıman uçaklarındaki radar yankısı için kaplamalarda,
- Havai fişekler ve işaret fişeklerinde (kuvvetli yeşil ışığından dolayı),
- Silisyuma fosfor aşılmasında,
- Atom reaktörlerindeki kontrol çubuklarında (Ferrobor ve 10B),
- Radyasyona dayanıklı kıyafetlerde,
- Gübrelerde,
- Uçak yakıtlarının temizlenmesinde kullanılabilir.

Ayrıca;

Bor Bileşiklerinin Kullanıldığı Önemli Uygulamalar:

- Çamaşır tozlarında,
- Termik izolasyonlarda,
- Işık dalgası iletkenlerinde,
- Isıya dayanıklı cam yapımında,
- Seramik vernikleme (sırlama) yapımında,
- Bitki koruma (haşarata karşı) malzemelerinde,
- Fren ve debriyaj balatalarında,
- Zırh ve kursun geçirmez yeleklerde,
- Lehim kullanımında (borik asit),
- Tahta koruma ürünlerinde,
- Aleve dayanıklılığından dolayı platinlerde,
- UV dalgasını engellemesi açısından güneş yağlarında,
- Hava yastıklarında ateşleyici olarak,

- Kanser tedavisinde terapi metodu olarak kullanılmaktadırlar (<http://www.nnt.com.tr/bor/bor-kullanim-alanlari.php>,2017).

Bu tez çalışmasında yüzey işlemlerinden biri olan borlama yapılmıştır. Bor elementinin yüzey sertleştirme özelliği incelenmiştir. Tezde kullanılan malzemeler, yöntemler ve cihazlar detaylı olarak anlatılmıştır.

2.BORLAMA

Borlama, yüzeyi sertleştirilmiş çeliklere, temperlenmiş çeliklere, takım çeliklerine, paslanmaz çeliklere, dökme demirlere, sinterlenmiş metal tozlarına, nikel, kobalt, molibden ve titanyum gibi demir dışı metallere ve alaşımlarına, bu alaşımların toz metalurjisi yöntemiyle üretilen tozlarına, bazı süper alaşımlar ile sermetler gibi birçok malzeme grubuna uygulanabilen termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir (Karakan vd., 2002). Borlama işleminde, bor bileşiklerindeki bor atomları difüzyonla yayınarak, borlanacak malzeme atomları tarafından kafesteki boşluklara doğru çekilirler. Böylelikle malzemenin atomları ve bor atomlarının birlikte oluşturduğu farklı fazlar meydana gelir. Bu fazlar da malzeme yüzeyindeki borür tabakalarını oluştururlar. Borür tabakaları malzemenin yüzeyini sertleştirir, fakat malzeme yüzeyinin sertliği, malzemenin bileşimi ve borla kaplanan yüzeyin morfolojisine göre değişir (Sinha vd., 1991).

İşlem, katı toz (borlaştırıcı bileşik), macun, sıvı veya gaz halinde yaklaşık 700 °C ile 1200 °C aralığında, tercihen 1 ile 12 saat süreyle, iyi temizlenmiş malzemelere uygulanabilmektedir. Günümüzde plazma borlama veya akışkan yataklı fırında borlama gibi özel yöntemlerde kullanılmaktadır. Borlama sırasında, bor atomlarının bileşen yüzeyinin metalik kafes içine difüzyonu ve ardından emilmesi ile bor bileşikleri oluşur. Oluşan tabaka ya tek fazlı ya da çok fazlı bir borür tabakasından oluşabilir. Borür tabakasının şekli, büyümesi ve faz kompozisyonu, temel materyaldeki alaşım elementleri tarafından etkilenebilir. Borlanmış tabakanın mikro sertliği, borür tabakasının bileşimi ve yapısına ayrıca taban materyalin kompozisyonuna da bağlıdır (Sinha vd., 1991). Borlama işlemi sonucu oluşturulan borür fazlarının en önemli özellikleri yüksek sertlik (1400-5000 Vickers Sertliği (HV)) ve yüksek ergime sıcaklığına (1400-1550 °C) sahip olmasıdır (Maragoudakis vd., 2002). Özellikle çeliklerde yüksek sertlik değerleri 6500 °C'ye kadar muhafaza edilebilmektedir. Borlama ile diğer yöntemlere göre yüzeyde daha sert bir tabaka elde edilmektedir (Göy,1984). Malzemelerin yüzeylerinde elde edilen borlu tabakaların sertliği, yüzey işlemlerinden sonra uygulanan ısıtma işlemlerinde de muhafaza edilmektedir. Sementasyonla yüzeyi sertleştirilmiş tabakalar ısıtma işlemi ile yumuşarken borlu tabakaların sertliği 9000 °C'ye kadar korunmaktadır. Borlu tabakaların sertlik ölçümleri mikrosertlik şeklinde ve tabaka kalınlığına bağlı olarak genellikle 25-200 gr'lık yüklerle yapılmaktadır (Şen, 1998).

2.1. Borlu Tabakaların Özellikleri

2.1.1. Borlama ile aşınma direncini artırma

Sürtünme katsayısı ve aşınma dayanımı bir sistem özelliği olmakla birlikte, genellikle yüksek aşınma direnci için malzemenin aşındırıcıdan daha sert ve sürtünme katsayısının düşük olması istenir. Borlama ile bu özellikler malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak borür fazlarında büyük ölçüde sağlanır (Atik, 1997). Borun oksijene olan ilgisi yüksek olduğundan yüzeyde ince bir oksit tabakası oluşturmakta, bu ince oksit filmde yağlayıcı vazifesi görerek sürtünme katsayısını düşürmektedir (Biddulph, 1977).

Borlama işlemine tabi tutulmuş malzemelerin aşınma özelliklerinin belirlenmesi için pek çok çalışma yapılmıştır. Örneğin U. Şen farklı alaşımlardaki küresel grafitli dökme demirleri 850 °C ve 950 °C’lerde borladıktan sonra üç farklı yükte (2, 5 ve 10 N) 5000 devir mesafede ve 200 dev/dk. hızda, WC-Co esaslı aşındırıcı bilyelerle (ball-on disk testi) aşınma deneylerine tabi tutmuş, sürtünme katsayılarının 0,11 ila 0,20 arasında olduğunu tespit etmiştir (Şen, 1998). Li ve arkadaşları ise $Cr_{12}Mn_2V_2$ çeliğine 900 ile 950 °C’lerde borlama işlemi uygulamışlar ve block-on ring aşınma testi ile aşınma durumunu tespit etmişlerdir. Aşındırıcı olarak üzeri Al_2O_3 kaplı çelik kullanılmış, 30N yük uygulanarak yapılan testler sonucu aşınma oranları 10,5 ila 91 $mg.km^{-1}$ olarak tespit edilmiştir (Chunmin Li vd., 2008). Polat Topuz doktora tezinde 7 farklı tür çeliği 850, 950 ve 1050 °C sıcaklıklarda, 1, 2 ve 4 saat süre ile borlamış, daha sonra ball-on disk aşınma testi uygulamış, borladığı tüm numunelerde 2 ila 3 kat arası sürtünme katsayılarında düşüş elde etmiştir (Topuz, 2009).

2.1.2. Borlama ile korozyon direncini artırma

Borlanmış malzemelerin korozyon dirençlerini belirlemek içinde pek çok deney gerçekleştirilmiştir. Borlanmış yüzeylerin suya ve atmosfere karşı korozyon dayanımları düşük olmasının yanı sıra bazı asit ve sıvı metallere karşı korozyon direnci yüksektir. Özellikle HCl, H_2SO_4 ve H_3PO_4 gibi asitler ile alüminyum, kurşun ve çinko gibi metallerin sıvı durumlarına karşı korozyon dirençleri çok yüksektir (Delikanlı,2003).

İTÜ FBE' de tamamlanmış olan bir yüksek lisans tezinde, çeşitli çeliklere borlama işlemi uygulandıktan sonra, korozyon deneyleri için borlanmış ve borlanmamış numuneler farklı oranlarda asit içeren çözeltiler içersinde oda sıcaklığında 12 saat süreyle bekletilmişlerdir. Deneylerde %10'luk H_2SO_4 , %15'lik HCl ve %30'luk H_3PO_4 çözeltileri kullanılmıştır. Korozyon deneyleri sonuçlarına göre kullanılan malzemelerin korozyon dayanımları borlama yoluyla 2 ila 73 kata kadar arttığı tespit edilmiştir (Umut Yapar, 2003).

2003 yılına ait diğer bir çalışmada ise 850 ila 1000 °C sıcaklık aralığında 2 ila 10 saat sürelerde AISI 1015, 1040, D2 ve 304 kalite çeliklere EKabor-3 borlama ajanı vasıtasıyla borlama işlemi uygulanmış ve daha sonra 56 °C sıcaklıkta %10 H_2SO_4 çözeltilisinde bekletilmişlerdir. Aynı çeliklere nitrasyon ve karbürizasyon da uygulanan çalışmada korozyon direncini borlamanın muazzam bir şekilde arttırdığını tespit etmişlerdir. Buradan çıkan bir sonuca göre de borlama ile meydana gelen borür tabakası kalınlığı arttıkça, korozyon direnci de artmaktadır (Atık, 1984). Yüksek kromlu çeliklerde yüzeyde oksit tabakasının yerini bor aldığından korozyon dirençleri her zaman istendiği gibi yüksek olmayabilmektedir (Nazım, 1984).

2.1.3. Borlama ile yorulma direncini artırma

Demir esaslı toz metalurjik parçaların borlanması sonucu, yorulma dirençlerinde belli bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle demir+bakır+grafit malzemedan üretilmiş bu tip numunelerin borlanmış olanlarında yorulma deneyleri sonucu iyi değerler elde edilmiştir (Bindal, 1991).

2017 yılında gerçekleştirilmiş olan bir çalışmada, borlanmış çeliklerin yorulma dirençleri ölçülmüş, malzeme ömürlerinde %15 ila %20 oranında arttığı tespit edilmiştir (Barkat vd., 2017).

2.2. Borlama Yöntemleri

Borlama ısı işlemi pek çok farklı yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemler, borlama şekline, borlayıcının çeşidine veya borlama ortamına göre

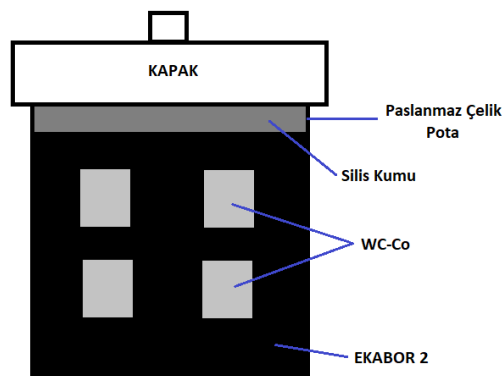
değerlendirilebilir. Temel olarak katı, sıvı, gaz ve plazma ortamlarında borlama gerçekleştirilebilmektedir. Endüstride yaygın olarak kullanılan borlama yöntemleri aşağıda anlatılmıştır.

2.2.1. Katı borlama

2.2.1.1. Kutu borlama

Güvenliği, kullanılan toz karışımının oranlarının değiştirilerek ayarlanabilmesi, basit donanım gerektirmesi nedeniyle en yaygın borlama tekniğidir. Kutu borlama işlemi kutuya alma, ısıtma ve temizleme aşamalarından oluşur (Sinha vd., 1991).

Kutu borlamada, borlanacak malzemeler, toz halindeki geleneksel borlama karışımı (% 5 B₄C, %5 KBF₄, %90 SiC) veya ticari adı Ekabor olan toz karışımını içerisine, aralarında en az 20 mm mesafe kalacak şekilde gömülürler. Potanın içindeki toz karışımı, borlanacak parçaların etrafını 10-20 mm kalınlığında sarmalıdır. Borlama tozlarının üzerine dolgu malzemesi olarak SiO₂ (silis kumu), Al₂O₃ (alüminyum oksit) veya ticari adı Ekrit olan toz doldurulur ve sisteme hava girişini önlemek için potanın ağzı kapakla kapatılır (Blocher vd., 1981). Kutu borlamanın şematik gösterimi şekil 2.1.'de; borlamada kullanılan Ekabor'un özellikleri ise Çizelge 2.1'de verilmiştir (Bortec, 2008).



Şekil 2.1 Kutu borlamanın şematik gösterimi

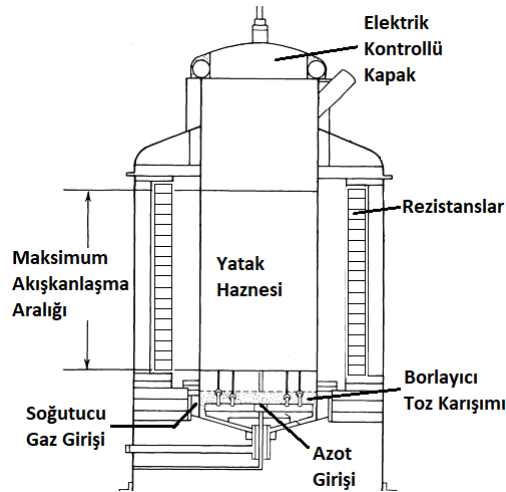
Çizelge 2.1 Borlama işlemlerinde kullanılan Ekabor türleri ve özellikleri

Tip	Tane Boyutu (μm)	Kompakt Yoğunluk (gr/cm^3)	Özellik
Ekabor1	≤ 150	1,90	Yüzey kalitesi en yüksek tabaka için; birlikte bağlanmaya eğilimli.
Ekabor2	≤ 850	1,70	Mükemmel yüzey kalitesi; işlem sonrası parçadan kolaylıkla ayrılma.
Ekabor3	$\leq 1,400$	0,95	Çok iyi yüzey kalitesi; işlem sonrasındaki toz akıcılığı hala iyidir.
Ekabor HM	≤ 150	0,95	Çok iyi yüzey kalitesi; sert metal, küçük delik ve kalın tabakalar için.
Ekabor WB	220–350	0,95	Oksijensiz gaz atmosferde kullanılır.
Ekabor Pasta	-	1,90	Daldırma, fırça ile sürme ve püskürtme ile uygulanabilir, inert gaz altında çalışılmalı.
EKrit	≤ 420	1,55	Örtü malzemesi, borlama süresince toz borlama ürünlerine oksijen sızmasını önler.

Borlama işlemi tamamlanan numuneler, oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Soğuma tamamlandıktan sonra numuneler inceleme için hazır hale gelmiş olur. Oluşması muhtemel olumsuzlukların önlenmesi amacıyla kutu borlama yönteminin koruyucu gaz atmosferinde gerçekleştirilmesi uygun olur. Bu gaz ortamı saf argon, saf azot, hidrojen ve argon karışımı ya da herhangi bir özel gaz ortamı olabilir. (Bortec, 2008).

2.2.1.2. Akışkan yatakta borlama

Katı ortam borlama yöntemlerinden birisidir. Akışkan yatakta borlama yönteminde, akıcı ortam olarak borlama tozu (Ekabor vb.) kullanılır. Bu toz, oksijensiz gaz (N_2-H_2 karışımı gibi) ile akıcı hale gelmektedir. Borlama işlemi, borlama tozu ve oksijensiz bir gazın taban malzemesini içeren akışkan bir yatak içerisinde gerçekleşir. Elektrik, ısı kaynağı olarak kullanıldığı zaman, taban daha hızlı bir ısı transfer ortamı oluşturur (Çelebi, 2005). (Anthymidis vd., 2003). Şekil 2.2’de akışkan yataklı fırın tiplerinden, dıştan rezistanslı akışkan yataklı fırın tipine ait resim yer almaktadır. Geleneksel olan bu tip fırınlarda yatak kısmına borlayıcı toz karışımı konulmakta, elektrikle ısıtılan fırın yatağına alttan saf azot gazı belli debi ayarında üflenmekte ve akışkanlaşan toz karışımı içine borlanacak numuneler daldırılmaktadır.



Şekil 2.2 Dıştan rezistanslı akışkanlı yatak gösterimi

Akışkan yataklı fırınların da farklı tipleri bulunmaktadır. Yatağın boyutlarına ve rezistansların konumuna göre uygun bir tüp pota ilavesiyle bu fırın endirekt ısıtmalı akışkan yataklı fırın tipine dönüştürülebilmekte ve bu dönüşüm sonucu maliyetten bir takım tasarruflarda bulunulabilmektedir. Bir diğer avantaj olarak ta çevreye zarar verici bir takım gaz emisyonları da büyük ölçüde giderilebilmektedir (Topuz, 2009).

2.2.1.3. Pasta borlama

Bu yöntem, her ne kadar katı ile sıvı borlama arasında yer alan bir yöntem olsa da, yöntem olarak kutu borlamaya benzemesi sebebi ile katı borlama yöntemleri içinde değerlendirilebilir. Pasta borlama, kutu borlamayla kıyaslandığında daha az zaman, manuel çalışma azlığı ve ucuzluk açısından daha kullanışlı bir yöntemdir (Campos vd., 2003). Bor karbür (B_4C), kriyolit (Na_3AlF_6) ve bağlayıcı olarak da hidrolize edilmiş etil-silikat karışımından macun yapılarak borlama işlemi gerçekleştirilir. Macun halindeki karışım, borlanacak malzeme yüzeyine en az 2 mm kalınlıkta sürülür. Daha sonra macunlanan malzeme hemen sıcak hava akımında, ön ısıtma odasında veya kurutma fırınında maksimum $150^{\circ}C$ 'de kurutulmalıdır. Gerektiği 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. Kaliteli bir borür tabakası elde etmek için işlem koruyucu atmosfer ortamında gerçekleştirilmelidir (Şimşek, 2005).



Şekil 2.3 Pasta borlama macunu

2.2.2. Sıvı borlama

Sıvı borlama, elektrolitik ve elektrolitik olmayan sıvı borlama olarak iki çeşit tuz banyosunda borlama işleminden ibarettir ve hem avantajları hem de bazı dezavantajları vardır. Bir indüksiyon tuzu banyosundaki yüksek frekanslı elektromanyetik alan borakstaki borun azalmasını önler. Grafit pota içerisinde yapılan sıvı borlama işlemi daha yoğun olur. Çatlak oluşumuna karşı daha dayanıklı borür yapıları oluşur (Simonenko vd. 1982). Borlama tuzunun parça yüzeyinden temizlenmesinin zor olması ve yeteri kadar parçaya nüfuz etmemesi ve bu durumların zaman ve maliyetten kayıba yol açması, ayrıca bazı

korozif durumlara yol açabilmesi başlıca dezavantajlarından bazıları olarak sayılabilir (Sinha vd., 1991). Bunlardan başka erimiş boraksın akıcılığının azalmasından dolayı 850°C altında sıvı borlama yapılmasının da imkansız olduğu belirlenmiştir (Bayça ve Şahin, 2004).

2.2.2.1. Elektrolitik sıvı borlama

Bu işlemde borlanacak olan demir esaslı malzeme katot ve grafit malzemede (pota) anot görevindedir. Pota içerisindeki eritilmiş boraks içine yerleştirilen borlanacak malzeme, 900-1000 °C’ de belli süreyle, belli akım yoğunluğuyla borlanır. Bu işlem sırasında borlanacak malzeme çevrilmek suretiyle üniform bir tabaka elde edilmeye çalışılır. Borlama işlemi tamamlandıktan sonra parçalar oda sıcaklığında soğutulur (Sinha vd., 1991 ; Topuz, 2009).

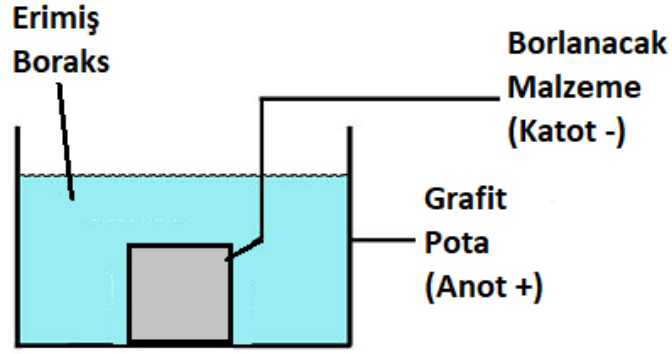
Elektrolitik sıvı borlama işleminde ergimiş borakstan, borik asit ve doymamış oksijen çıkışı olur.



Eşzamanlı olarak, sodyum iyonları borlanacak malzeme çevresinde nötralize olduktan sonra, borik asitle reaksiyona girerek boru serbest bırakırlar.



Bor birikimi borlanacak malzemenin çevresinde sağlanmaktadır.



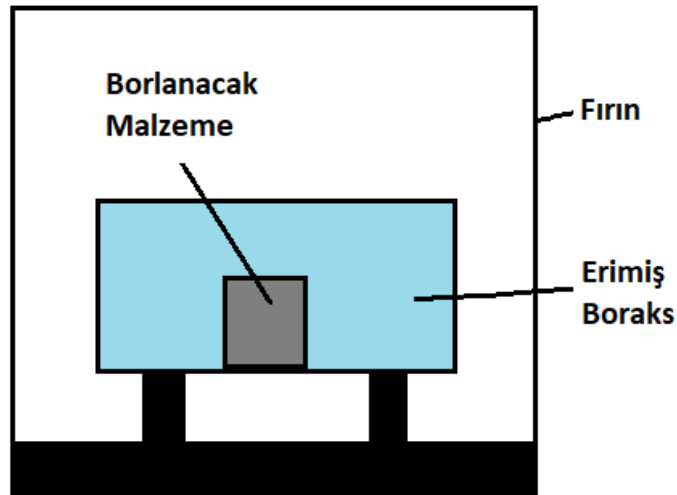
Şekil 2.4 Elektrolitik sıvı borlama kabı

Elektrolitik sıvı borlama işlemi için farklı olarak kullanılabilen diğer elektrolitik tuz banyosu bileşimleri de literatürde şu şekilde verilmiştir (Sinha vd., 1991 ; Topuz, 2009).

- 600 °C -900 °C sıcaklıkta KBF_4 -LiF-NaF-KF karışımı
- 800 °C -900 °C sıcaklıkta, 90N_2 - 10H_2 atmosferinde 20KF - 50LiF - 30NaF - 0.7BF_2 karışımı
- Argon atmosferinde, 9:1 oranında (KF- LiF)- KBF_4 karışımı
- 650 °C sıcaklıkta, KBF_4 -NaCl karışımı
- 700 °C -850 °C sıcaklıkta, $90(30\text{LiF}-70\text{KF})$ - 10KBF_4 karışımı
- 800 °C -900 °C sıcaklıkta, $80\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ - 20NaCl karışımı.

2.2.2.2. Elektrolitik olmayan sıvı borlama

Demir esaslı malzemelerin elektrolitik olmayan sıvı borlama işlemi, 900-950 °C sıcaklık aralığında boraks bazlı eriyiklere %30 B_4C ilave edilerek yapılmaktadır. Borlama işleminde %20 B_4C yerine daha iyi bir redükleyici olan ferro-alüminyum da eklenebilir. En iyi sonuçlar %55 boraks, %40-50 ferrobör ve %4-5 ferroalüminyum içeren tuz banyolarında yapılan borlama ile elde edilmiştir. Nikel alaşımlarının borlanması, 670°C'nin altındaki sıcaklıklarda KBF_4 - KF tuz banyosu 75:25 oranında kullanılabilir; demir alaşımlarının borlanması ise yüksek sıcaklıklarda KBF_4 - KF tuz banyosu 75:25 oranında kullanılarak tabaka kalınlığının gelişmesi arzu edilir (Sinha vd., 1991 ; Topuz, 2009).

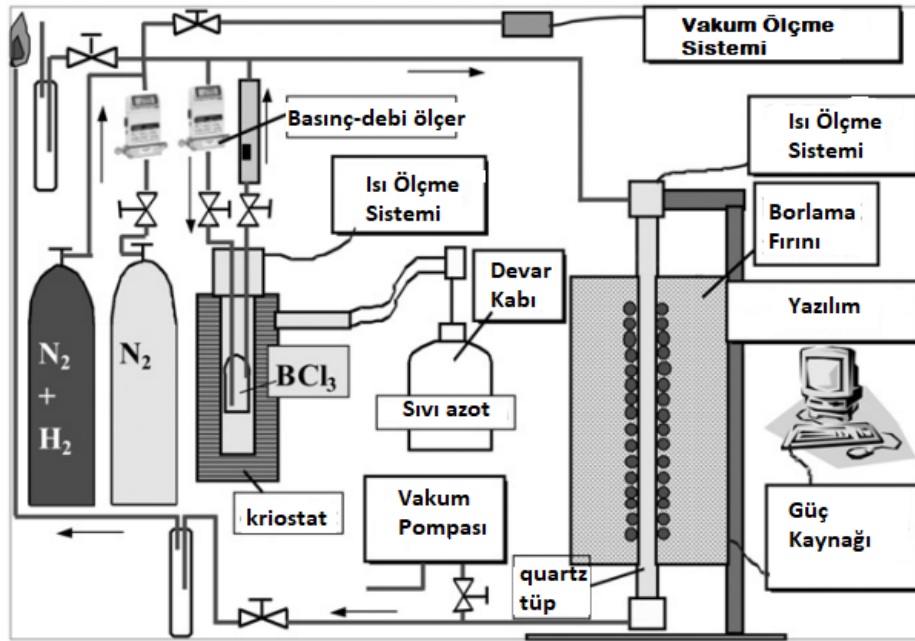


Şekil 2.5 Elektrolitik olmayan sıvı borlama kabı

2.2.3. Gaz borlama

Borun ısısal olarak parçalanmasıyla elde edilen buhar kullanılarak yapılan borlama işlemidir, böylelikle karışık şekilli parçaların borlanması kolaylaşır ve homojen bir tabaka elde edilebilir (Bhushan ve Gupta, 1991). Gaz borlama işlemi termokimyasal işlemler olan nitrasyon ve karbürizasyona benzer şekilde çok ekonomik olan borlama işlemi olarak bilinir. Gaz fazında yapılan bu borlama işleminde Diborane (B_2H_6)- H_2 karışımı ve Borhalid (iyonize bor)- H_2 ve 75/25 N_2/H_2 gaz karışımı kullanılmaktadır. Bu maddeler toksik olmaları ve korozyon hassasiyetlerinden dolayı pek tercih edilmemektedirler. Bunlara alternatif olarak Trimetil bor ($(CH_3)_3B$), Trietil bor ($(C_2H_5)_3$) ve Trietillamine bor kullanılmaktadır. Bu gazlar da zararlıdır, fakat toksik özelliklerinin olmamasından dolayı kullanılmaktadırlar (Küper vd. 2000).

Borlanacak malzemeler (1:15) BCl_3-H_2 gaz karışımında 700 ila 950 °C arasında ve 67 kPa basınçta borlama işlemine tabi tutulurlarsa borür tabaka kalınlığı 120 ila 150 μm arasında olabilmektedir (Sinha vd., 1991 ; Topuz, 2009). Şekil 2.6'da gaz borlama ünitesinin şematik resmi yer almaktadır.



Şekil 2.6 Gaz borlama ünitesi (Kulka vd., 2012)

2.2.4. Plazma borlama

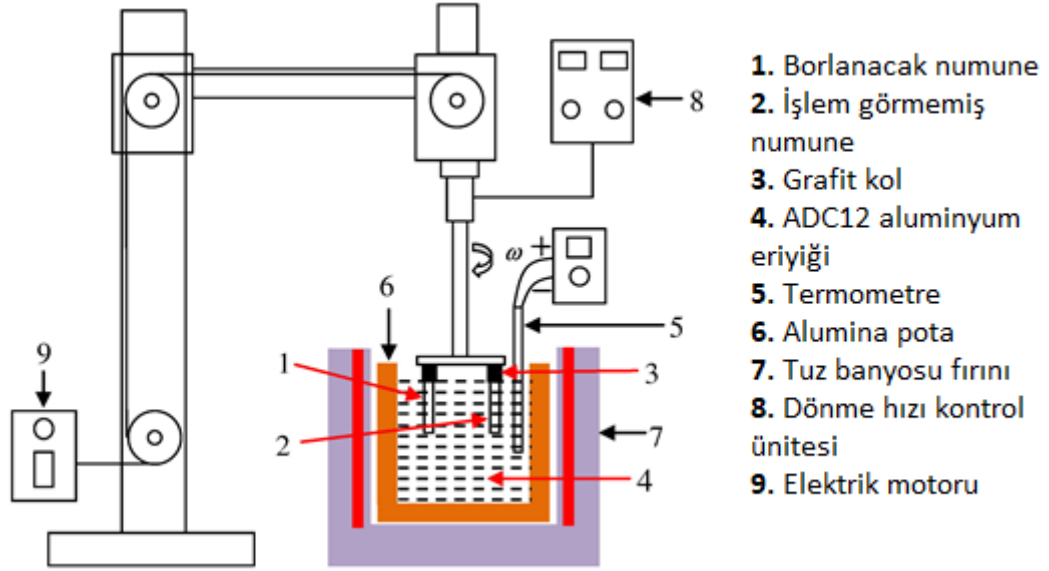
Plazma borlama geleneksel borlama yöntemlerine göre pek çok avantaja sahip bir yöntemdir. Yüksek enerji verimliliği ve diğer yöntemlere göre daha düşük işlem sıcaklığı ile borlanan malzemelerin çarpılma riski minimumdur. Bunun yanı sıra bazı kısıtlamaları da mevcuttur. B₂H₆ ve BCl₃ gazları, borlamada kullanmak için oldukça pahalı, toksik ve patlayıcıdır. Ayrıca malzemelerin korozyona uğrama ihtimalleri de vardır (Yoon vd., 1999; Topuz, 2009).

Plazma borlama Ar, H₂ gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl₃, B₂H₆, BF₃ veya B(OCH₃)₃ (trimetilborat) kullanarak 800 °C -1000 °C sıcaklıkta, yaklaşık 10⁻² Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır. Mikro yapı ve demirbor tabakalarının büyümesi işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir (Sinha vd., 1991). (Topuz, 2009).

Bunların yanı sıra literatürde yer alan plazma borlama gazları şöyledir.

1. $BCl_3 + 3/2H_2 + Fe \rightarrow B + FeB + 3HCl$
2. $BCl_3 + 3/2H_2 \rightarrow B + 3HCl$

3. $\text{BCl}_3 + 3\text{H} + \text{Fe} \rightarrow \text{B} + \text{FeB} + 3\text{HCl}$
4. $\text{BCl}_3 + 3\text{H} \rightarrow \text{B} + 3\text{HCl}$ (Filepa ve Farkas, 2005).



Şekil 2.7 Plazma borlama ünitesi (Yang vd., 2013).

2.2.5. Çok bileşenli borlama

Çok bileşenli borlama, malzemelere herhangi bir borlama yöntemiyle bor yayındırılmasından sonra yüzeyde oluşmuş olan borür tabakası üzerine alüminyum, krom, silisyum, vanadyum ve titanyum gibi metalik elementlerden bir veya bir kaçının aynı anda veya birbiri ardına yayındırılması işlemidir. İki kademeli olarak 850-1050⁰C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir (Sinha vd., 1991; Topuz, 2009).

Çok bileşenli borlama her ne kadar tuz banyosu ve pasta borlama tekniklerinden oluşuyormuş gibi bilinse de, pek çok araştırmacı kutu borlama tekniği üzerinde yoğunlaşmaktadır. Örneğin bor-silikonlama, öncelikle kutu borlama metodu ile borlama ve daha sonra 900-1000 °C aralığında silikonlama ile elde edilebilmektedir. Elde edilen FeSi fazı, korozyon ve yorulma dayanımı sağlamaktadır. Gaz borlama metodu her ne kadar bor-silikonlama için elverişli bir yöntem olmasa da WB, ZrB₂ ve TiB₂ gibi borürler elde edilebilmektedir (US Patent 5064691,1991). FeB fazının oluşumu iyi sonuçlar vermekte ve 30 µm civarındaki kaplamalar yeterli olmaktadır. 2. kademede, elementin difüzyonu

gerçekleştirilmektedir. Boraks esaslı eriyik veya toz karışımı yardımıyla metalik elementin borlanmış yüzeye difüzyonu sağlanmaktadır. Eğer kutu borlama yöntemi kullanılırsa, ortamdaki Ar veya H₂ gazı geçirilerek reaksiyon sırasında sinterleme oluşumuna engel olunabilmektedir. Altı çeşit çok bileşenli borlama türü mevcut olup bunlar, bor-alüminyumlama, bor-silisyumlama, bor-kromlama, bor-krom-titanyumlama, bor-krom-vanadyumlama ve bor-vanadyumlama şeklinde sınıflandırılabilir (Sinha vd., 1991).

Örnek vermek gerekirse östenitik çeliklerin aşınma dayanımını arttırmak için bor-kromlama, plastik işleme makinelerinin bazı parçaları için bor-krom-titanyumlama gibi uygulamalar gerçekleştirilebilmektedir (Davis, 2002).

Çok bileşenli borlama işlemine dair örnekler Çizelge 2.2’de verilmiştir(Sinha vd., 1991).

Çizelge 2.2 Çok bileşenli borlama işlemine dair örnekler

Malzeme	Borlama Sıcaklığı (°C)	İkincil işlem Sıcaklığı (°C)	Çok bileşenli borlama tekniği	Uygulama Tekniği	Borlama sonrası işlem bileşenleri
Çelik	1050	1050	Bor-alüminyumlama	Kutu	%97 ferroalüminyum + %3 NH ₄ Cl
Çelik	900	1000	Bor-kromlama	Kutu	%78 ferrokrom + %20 Al ₂ O ₃ + %2 NH ₄ Cl
Çelik	900	1000	Bor-silikonlama	Kutu	%100 Si
Çelik	900	1000	Bor-vanadyumlama	Kutu	%60 ferrovanadyum + %37 Al ₂ O ₃ + %3 NH ₄ Cl

2.3. Borlamada Kullanılan Isıl İşlem Fırınları

Borlamada kullanılan ısıl işlem fırınlarına geçmeden önce, ısıl işlem teriminin açıklanması gerekmektedir. Isıl işlem, Uluslararası standartlarda, katı haldeki metal veya alaşımlara belirli özellikler kazandırmak amacıyla bir veya daha çok sayıda, yerine göre birbiri peşine zamanlanarak uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleri olarak tarif edilmektedir (TS EN ISO 4885, 2017). Bu ısıl işlem proseslerinin gerçekleştirildiği fırınlara da ısıl işlem fırını adı verilmektedir. Çeşit olarak onlarca tip ısıl işlem fırını kullanılmaktadır. Yapacağı işlemin özelliğine göre yüksek sıcaklık fırınları, atmosfer kontrollü fırınlar, akışkan yataklı fırınlar, vakumlu fırınlar vb. çeşitlerinin yanı sıra şekil ve büyüklüğüne göre de sınıflandırılabilirler. Fırınlarda en önemli özellik ısı transferi olayıdır. İyi bir fırında ısının her yönde eşit dağılması istenir ve bu da ısı transferi ile alakalıdır. Isı transferi Termodinamiğin 2. Yasası ile şu şekilde ifade edilmektedir; “iki ortam arasında sıcaklık farkı varsa, ısı yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama geçer. Isının geçişi ortam sıcaklıklarındaki farka bağlı olduğu kadar, ortam ve yüzeylerinin özelliklerine de bağlıdır” (Francis vd., 2016).



Şekil 2.8 Isıl işlem fırını (datasheets.globalspec, 2018).

2.3.1. Atmosfer kontrollü fırınlar

Atmosfer kontrollü fırınlar, ısıtacakları malzeme ya da malzemelerin, normal atmosfer koşullarından etkilenmemeleri (oksitlenme vb.) veya kullanılacak gaz ile

etkileşime geçebilmeleri (nitrasyon vb.) için, argon, azot, hidrojen ve benzeri atmosfer koşullarında ısıtılmalarını sağlama amaçlı üretilmişlerdir. İçlerine verilen gazların oranları ayarlanarak, gerekli ihtiyaçlar giderilmektedir. Borlama işleminde de kullanılabilen, borlama esnasında parça yüzeylerine oksijenin ulaşmasını engellemek için saf azot ortamında işlem gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 2.9 Atmosfer kontrollü fırın

2.3.2. Vakumlu fırınlar

Atmosfer kontrollü fırınlarda olduğu gibi, çoğunlukla işlem gören parçanın atmosferik koşullardan etkilenmemesi için veya hızlı bir ısıtma sağlamak amaçlı üretilmiş fırınlardır. Fırın içerisindeki hava tamamen çekilerek ortam vakumlu ve basınçlı bir hale getirilmektedir. Dışarıdan müdahale edilmesi mümkün olmayan bu sistemlerde, parçaların çarpılma veya eğilme gibi istenmeyen durumlara maruz kalması mümkündür.



Şekil 2.10 Vakumlu fırın (diversifiedvacuum,2018).

2.3.3. Akışkan yataklı fırınlar

Akışkan yataklı fırın sistemlerinde, dışı rezistanslarla çevrilmiş bir hazne ve bu haznenin içerisinde de yaklaşık 100 μm boyutlu toz Al_2O_3 tozu bulunmaktadır. İstenilen sıcaklığa kadar ısıtılan bu hazne ve içerisindeki tozlar, fırının altından basınçlı olarak verilen gazın yardımıyla hareketlenmekte ve sıvıymış gibi hareket etmektedirler. Böylece, hazne içerisine yerleştirilen parçaların tüm yüzeyleri eşit şekilde ısıtılabilir. Borlama işlemleri için ise, Al_2O_3 tozu yerine, borlayıcı toz, alttan verilen saf azot gazı ile akışkanlaştırılmaktadır.



Şekil 2.11 Akışkan yataklı fırın ve haznedeki akışkanlaşma durumu (Topuz, 2009).

Isıl işlem fırınlarının karşılaştırılması Çizelge 2.3’de verilmiştir. (Akdoğan, 2007; Reynoldson,1993; Cömert, 2002).

Çizelge 2.3 Isıl işlem fırınlarının karşılaştırılması

FAKTÖRLER	Puan	Vakumlu	Vakumlu	Akışkan	Atmosfer
		fırın	fırın	yataklı	kontrolü fırın
		<1 bar	>5 bar	fırın	
Sıcaklık dağılımı (boş)	10	8	8	10	8
Sıcaklık dağılımı (dolu)	10	7	7	10	8
Isıtma hızı	10	6	6	9	8
Homojen ısıtma	10	8	8	10	9
Son yüzey durumu	10	10	10	8	8
Yüzey yapısı	10	10	10	10	10
Sıcaklık aralığı 1200 ⁰ C	10	10	10	10	10
Sertleştirme sonrası yapı	10	5	8	10	8
Çarpılma	10	10	8	9	9
Kalite kontrol	10	9	9	10	9
% Oran değişimi	100	83	84	96	83

2.4. Metalik Malzemelerin İçerisindeki Alaşım Elementlerinin Borlama İşlemine Etkisi

Demir (Fe), Bor elementi ile etkileşim gösteren ve demir borür oluşumuna sebep olan elementtir. Bor ile farklı fazlar oluşturabilmektedir (Topuz, 2009).

Karbon (C), borlama sırasında bor tabakasının içinde çözünmediğinden, borür tabakasına herhangi bir etkisi yoktur (Topuz, 2009).

Silisyum (Si) ve Alüminyum (Al), bor tabakası içinde çözünmeyip bor atomları tarafından yüzeyden içeri doğru itilirler (Topuz, 2009).

Krom (Cr), borür tabakasının hem morfolojisini hem de derinliğini etkilemektedir. Malzemenin içerdiği krom miktarı arttıkça bor tabakasının özellikleri olumlu yönde gelişmekte, borca zengin bileşikler oluşmakta, ayrıca borür tabakasının kalınlığı azalmakla birlikte, borür tabakası ile matris arayüzeyi yassılaşılarak düzleşmektedir (Özbek, 1999; Uzun, 2002; Yapar, 2003).

Nikel (Ni), bor elementi ile etkileşime girererek farklı fazların oluşumuna imkan vermekle beraber, borür tabakasının morfolojisini ve tabakanın kalınlığını azalmaktadır (Topuz, 2009).

Mangan (Mn), kroma benzer şekilde tercihli olarak bor tabakasına girerek yüzeye doğru yayılmaktadır. Mangan, borür tabakasının kalınlığını düşürmekte, aynı zamanda kırılma tokluğuna olumlu etki etmektedir (Topuz, 2009).

Vanadyum (V), bor elementiyle etkileşime girerek borür tabakası morfolojisi ve kalınlığına etki eder. Vanadyum kararlı bor bileşikleri (VB, V₂B₃) oluşturur. Vanadyum borürleri Ti, Cr, Zr borürleri gibi yüksek ergime sıcaklığı, yüksek sertlik ve yüksek aşınma dayanımı göstermektedir (Özbek, 1993; Çelebi, 2005).

Tungsten (W) ve Molibden (Mo), bor ile etkileşime girebilir. Bileşime girebilen diğer elementlerde olduğu gibi borür tabakası morfolojisi ve kalınlığına etki etmektedirler (Çelebi, 2005).

2.5. Borlanabilen Malzemeler ve Oluşan Borürler

Borlama işlemleri temel olarak demirli (çelik, dökme demir vs.) veya demir dışı (bakır, alüminyum, tungsten vs.) malzemelere uygulanabilmektedir.

Alüminyum, silisyum ve azot içeren çelikler malzemelerinin yüzeyinde kırılğan borür fazları oluşturduğu için kullanıma uygun değildirler. Ayrıca kükürt v kurşun, borür tabakasının yüzeyden kalkmasına neden oldukları için bu alaşım elementlerini içeren çelikler borlanmamaktadır. Sementit karbürler, nikel, kobalt, titanyum gibi refrakter metal ve alaşımları borlanabilen malzemelerdir. Nikel plakaların borlanması, gaz ortamında $\text{BCl}_3\text{-H}_2\text{-Ar}$ karışımında 500-1000 °C sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. %85 B_4C ve %15 Na_2CO_3 karışımında veya %95 B_4C ve %5 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ toz karışımında 1000°C sıcaklıkta H_2 atmosferinde borlama yapılmaktadır (Sinha vd., 1991).

Bor, bakır ile herhangi bir reaksiyona girmez ve bakır içinde difüzyona uğrayamaz. Bakır kaplanmış metal tabakalar üzerinde çatlak veya porozite olmadıkça borlama uygulanamaz.

Refrakter metallerin borlanması ile yüzeyde değişik kompozisyonlarda kaplamalar elde edilmektedir. Refrakter metallerin yüzeyindeki kaplamaların sağladığı başlıca avantajlar:

- Yüksek sertlik
- İnorganik asitlere karşı dayanıklılık
- Yüksek sıcaklıkta hava ortamında oksidasyona karşı dayanıklılık

Titanyum, niobyum, tantalyum, molibden ve tungsten amorf bor ve %3 NH_4Cl karışımı ile borlandığı zaman tek fazlı borür tabakası oluşmaktadır. Bu metallerin üzerinde oluşan borür tabakaları TiB_2 , NbB_2 , MoB_2 ve W_2B 'dir. Titanyumun borlanması ile yüzeyde poroziteli bir tabaka oluşmaktadır ve oluşan borür tabakası yüzeyden pul pul ayrılmaktadır. Niobyumun borlanması ile yüzeyde yoğun, üniform ve ana metale kuvvetlice bağlanmış borür tabakası oluşmaktadır. Tantalyum, tungsten ve molibden borür tabakaları ana metale uygundur, özellikle molibden borür tabakası çok porozite içermektedir.

Titanyum ve alaşımlarının borlanması, kutu borlamayla veya $\text{H}_2 + \text{BCl} + \text{Ar}$ karışımında gaz borlamayla gerçekleştirilmektedir. Titanyum ve refrakter metallerin

borürlerinin, kobalt ve nikelin borürleriyle kıyaslandığı zaman daha üstün özelliklere sahip oldukları saptanmıştır. Nikel ve kobalt gibi yumuşak metallerin borlanmasıyla sinterlenmiş karbürlerin aşınma özelliklerine ulaşılabilir.

Molibden, tungsten, niyobyum, zirkonyum, tantalum ve renyumun borlanmasında yüksek sıcaklıklarda boşluklar ve kırılmalıklar oluştuğundan, bu metaller 1100-1500 °C sıcaklıkta borlanırlar.

Borlama işlemi östenit fazda gerçekleştiği için havada sertleşen çelikler borlama sonrasında hemen sertlik kazanırlar. Suda sertleşen malzemeler borür tabakasının termal şoka maruz kalacağı durumda borlanmazlar. Sülfürlenmiş ve kurşunlanmış çeliklerin yüzeyinde çatlak oluşum riski nedeniyle bu çeliklere borlama yapılmaz.

Karbonlu çeliklere uygulanan borlama işlemi sonrasında yüzeyde oluşan borür tabakası 2 çeşit borür fazı içermektedir. Çeliklerin dış yüzeyinde FeB fazı, FeB fazı ile matris metal arasında Fe₂B fazı oluşmaktadır (Sinha vd., 1991; Topuz, 2009).

Çizelge 2.4’de farklı malzemelerin borlanması ile oluşan borür fazlarının özellikleri yer almaktadır (Sinha vd., 1991).

Çizelge 2.4 Farklı malzemelerin borlanması ile oluşan borür fazları ve sertlikleri

Borlanan Malzeme	Oluşan Borür Fazı	Borür Fazı Sertliği (kg/mm²)
Fe	FeB	1900 - 2100
	Fe ₂ B	1800 - 2000
Co	CoB	1850
	Co ₂ B	1500 - 1600
	Co ₃ B	700 – 800
Ni	Ni ₂ B	1500
	Ni ₃ B	900
	Ni ₄ B ₃	1600

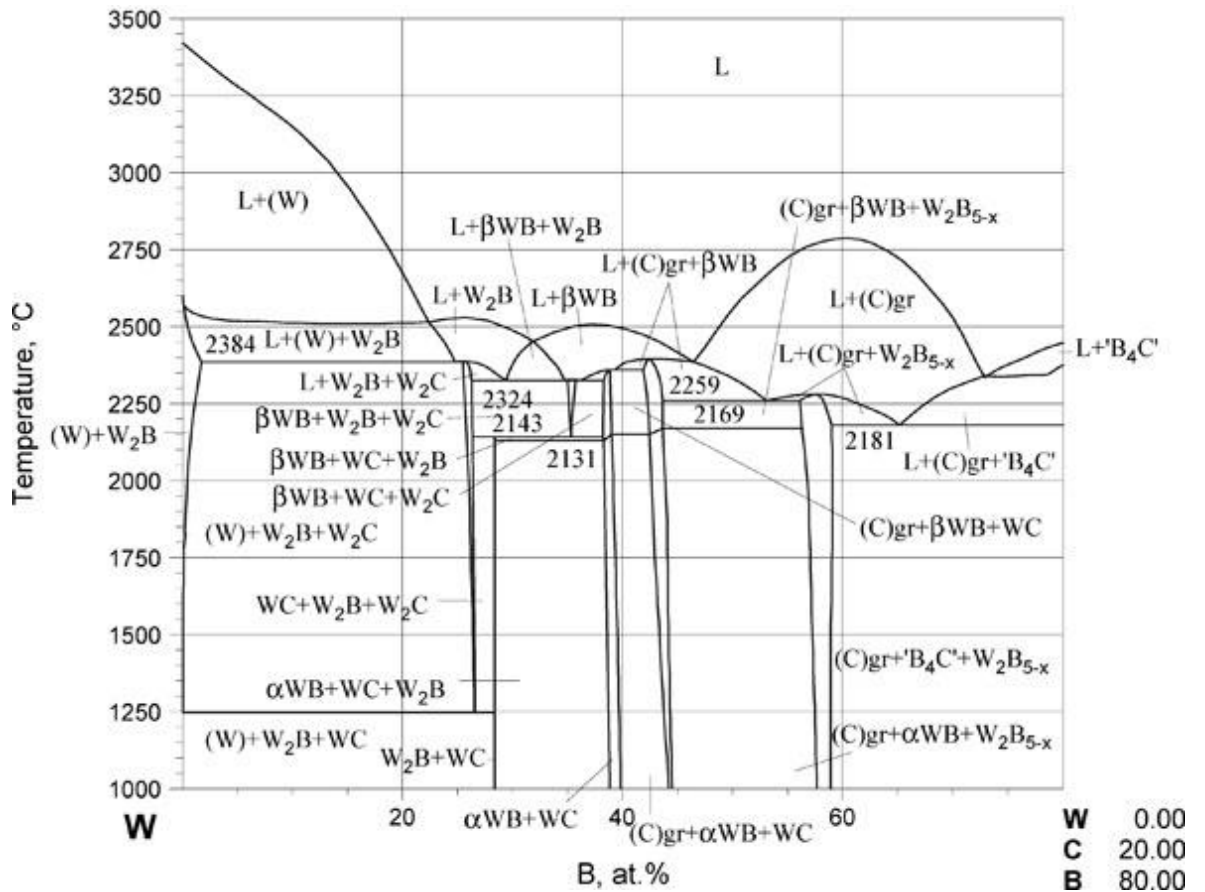
Mo	MoB ₂	2330
	Mo ₂ B	1660
	Mo ₂ B ₅	2400 - 2700
Ti	TiB	2500
	TiB ₂	3370
W	WB	3630
	W ₂ B	2370
	W ₂ B ₅	2600

Borlama islemi neticesinde elde edilebilen çeşitli borürlerin özellikleri Çizelge 2.5'de yer almaktadır.

Çizelge 2.5 Çeşitli borürlerin özellikleri (Özsoy,1991).

Malzeme ye göre oluşan borürler	Krista l yapı	Teorik yoğun. (gr/cm ³)	Erg. Sıcak. (°C)	Termal iletkenlik (W/m ⁰ K)	Elas. Mod. (GPa)	Elk. direnc (10 ⁶ Ωc m)
Co ₃ B	Orto.	8,13	1110	17	-	28
Co ₂ B	Tetra.	8,05	1260	14	-	33
CoB	Orto.	7,32	-	17	-	76
Cr ₂ B	Orto.	6,58	1870	10,9(20 °C)	-	107
CrB	Tetra.	6,14	-	20,1(20 °C)	-	46
Fe ₂ B	Tetra.	7,34	1410	17,4	284	38
FeB	Orto.	6,73	1650	12(20 °C)	343	80
Mn ₂ B	Tetra.	7,18	1580	6,6	-	40
MnB	Orto.	6,36	1890	7,7	-	57
Mo ₂ B	Tetra.	9,23	2280	-	-	40
MoB ₂	Hegz.	7,99	2375	-	-	45
Mo ₂ B ₅	Orto.	7,45	2140	50(20 °C)	672	26
NbB	Orto.	7,57	2917	15,6(27 °C)	-	40

NbB ₂	Hegz.	7,00	3036	23,5(27 °C)	637	26
Nb ₃ B ₄	Orto.	7,28	2935	20,5(27 °C)	-	34
NiB	Orto.	7,17	1590	21,9	-	50
Ni ₂ B	Tetra.	8,05	1225	54,8	-	14
TiB	Orto.	4,56	2190	-	-	40
TiB ₂	Hegz.	4,52	3225	64,4(27 °C)	551	9
W ₂ B	Tetra.	17,09	2670	-	-	-
WB	Orto.	-	2665	-	-	-
W ₂ B ₅	Orto.	13,17	2365	52(20 °C)	775	22
ZrB ₂	Hegz.	6,10	3245	57,9(27 °C)	343- 500	10



Şekil 2.12 Tungsten bor dengi diyagramı (Materials Science International Team, 2009).

2.5.1. Tungsten karbürün borlanması sonucu oluşan borür fazları ve özellikleri

Tungsten Karbür ve Kobalt tozlarının birleşimi ile elde edilen sermet malzemenin borlanması sonucu, içerisinde yer alan elementlerin bor ile difüzyona girebilenleri, belirli fazlar oluşturmaktadır. Genel olarak, borür tabakası oluşumunda etkili olan fazların hangi elementler tarafından oluşturulabileceği incelendiğinde, Demir (Fe), Krom (Cr), Mangan (Mn), Tungsten (W), Kobalt (Co) ve Vanadyum (V) gibi elementlere rastlanılmaktadır. Bazı elementler ise Silisyum (Si) veya Alüminyum (Al) gibi, bor ile difüzyon gerçekleştirememektedirler.

2.5.2. Tungsten (Wolfram)

Tungsten'in keşfi 17. YY'a kadar uzanmaktadır. Saksonya dağlarından olan Erz'de, kalay cevheri çıkarmak için uğraşan iki madenci, cevher yataklarındaki kalayın zamanla azaldığını, yerine farklı bir cüruf yapısını andıran oluşumun yer aldığını görmüşlerdir. Bu cevher oluşumunu farkedenden madenciler, yeni keşfedilmiş olan bu madene her ikisinin de soyadının birleşimi olan "Wolfram" adını vermişlerdir. 1758 yılında ise, İsveçli bilim adamı Axel Fredrik Cronstedt, alışılmıştan daha ağır olan bu taş şeklindeki minerale, İsveç dilinde "ağır-taş" manasına gelen "Tung-sten" adını vermiştir. Bilimsel açıdan bu mineralin yeni ve keşfedilmemiş olduğunu ilk defa kendisi ortaya atmıştır. 1781 yılında, yine İsveçli olan bilim adamı Carl Wilhelm Scheele, oksit izolasyonunu başararak "WO₃" (Tungsten tri-oksit) elde etmiştir. 1783 yılında Scheele'den bağımsız olarak iki İspanyol kardeş (Elhuyarde Suvisa kardeşler), mineral olan wolframiti, Tungsten metaline indirgemişlerdir. 1816 yılında Jöns Jacob Berzelius ve daha sonra 1824 yılında Friedrich Wöhler bu metal için "Wolfram" adını kullanmışlardır. Günümüzde ülkeden ülkeye değişmekle birlikte her iki isim (Tungsten veya Wolfram) de kullanılmaktadır.

Tungsten, endüstriyel anlamda ilk olarak 1900 yılında çelikler içine alaşım takviyesi olarak katılmaya başlamıştır. 1903 yılında W. D. Coolidge, sünek yapılı tungsten telini üretmeyi başarmıştır. Bu sayede ampullerin içerisinde yer alan tungsten teller kullanılmaya

başlanmıştır. 1923 yılında tungsten-karbür ve kobalt birleştirilerek sert metal olarak kullanılmaya başlanmış, günümüzde de halen kullanımı devam etmektedir. (www.azon.com, 2017; Ünal, 2006).

Tungsten, günümüzde atom numarası 74, atom ağırlığı 183,84, yoğunluğu 19.3 gr/cm³, erime sıcaklığı 3482 °C ve simgesi “W” ile gösterilen bir element olarak bilim literatüründe yer almaktadır. (<https://tr.wikipedia.org/wiki/volfram>, 2017).



Şekil 2.13 Tungsten (Wolfram)

2.5.3. Tungsten karbür (WC)

Tungsten karbür, wolframit (FeMnWO_4) veya şelit (CaWO_4) adı verilen cevherlerin işlenmesiyle elde edilmektedir. Tungsten karbür, “karbür seramikleri” sınıfında yer alan, insan yapımı, aşınmaya karşı oldukça dirençli sert bir maddedir (Groover, 2010).

Tungsten karbür, eşit miktarda tungsten ve karbon atomları içeren inorganik kimyasal bir bileşim olarak tanımlanmaktadır. Görüntü olarak çok küçük taneli gri bir toz karışımıdır.



Şekil 2.14 Tungsten karbür tozu

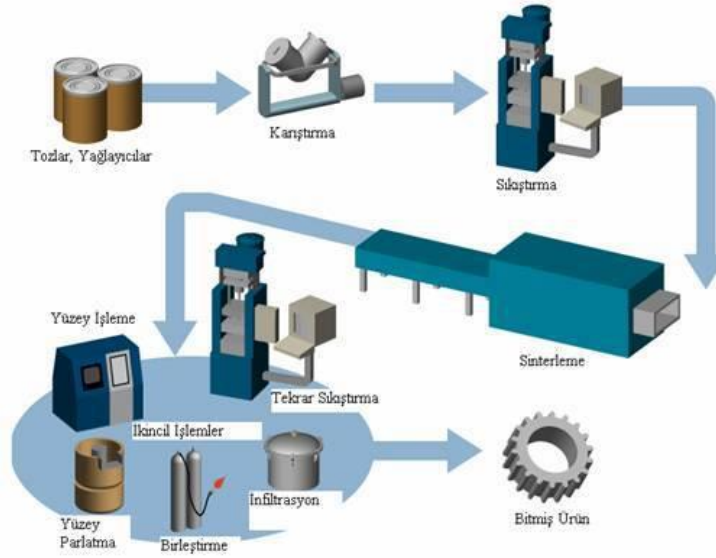
İstenilen tane boyutunda üretilmiş olan Tungsten tozu ile yüksek saflıktaki karbon tozunun (grafit veya kömür tozu) karıştırılması ve 1300 - 1600°C arasında hidrojen atmosferinde reaksiyona sokulması ile elde edilmektedir. Kullanılan tungsten tozunun boyutu, direkt olarak tungsten karbür tozunun da boyutunu etkilemektedir. Bu toz karışımı, Şekil 2.15’de görüldüğü gibi toz metalürjisi yöntemiyle, sert metal haline getirilebilmektedir.



Şekil 2.15 Tungsten karbür (çubuk şeklinde) (Anonim,2018).

2.5.4. Tungsten karbür sert metal üretimi

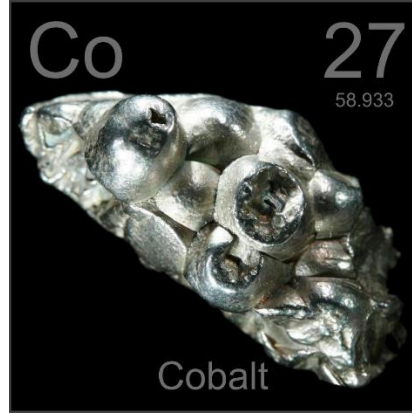
Toz halindeki tungsten karbürün sert metal haline getirilmesi için toz metalürjisi prosesi uygulanmaktadır. Buna göre; oranları ayarlanmış tungsten ve karbon tozlarının oluşturduğu karışım, ıslak öğütme işlemine tabi tutulur. Islak öğütme sonrası, kurutma işlemi sprey kurutma yöntemiyle yapılır. Kurumuş olan bu karışım, izostatik presleme işlemiyle granül hale getirilir. Granül haldeki ürün, istenilen şekilde işlendikten sonra, belli bir sıcaklıkta sinterleme işlemine tabi tutulur. Sinterleme, parçacıkların katı hal bağlantılarını sağlamlaştırmak ve dayanımlarını arttırmak için erime sıcaklığının hemen altındaki bir değere kadar ısıtma ve ardından da soğutma işlemine denmektedir. Sinterleme işlemi tamamlanan ürün kullanılabilir hale gelmiştir.



Şekil 2.16 Tungsten karbür sert metal üretimi (Anonim, 2018).

2.5.5. Kobalt (Co)

Almanca “kötü ruh, cin veya gulyabani” ifadelerinin karşılığı olan “kobolt” kelimesinden türetilen kobalt, İsveçli kimyager ve mineralog George Brandt tarafından 1735 yılında keşfedilmiştir. 16. yüzyılda kobaltın bakır minerali olduğu sanılıyordu. Ancak daha sonra arsenik ve kobalt içeren mineraller için kobalt adı kullanılmıştır. George Brandt, bu mineraldeki mavi rengin kobalttan kaynaklandığını tespit etmiştir. Bazı arkeolojik kazılarda bulunan çeşitli materyal ve objelerin yapısında kobalta rastlanmıştır. MÖ 3000 yıllarında Pers İmparatorluğu’nda kullanılan kolye boncukları, Mısır heykel ve heykelcikleri, Ming Hanedanı döneminde kullanılan mavi porselen tabak ve vazolarda, Çin’deki Tang Hanedanı dönemine ait camlarda kobalta rastlanmıştır. Kobaltın kimyasal sembolü ‘Co’ şeklindedir. Element tablosunun VIII-B grubunun 4. periyodunda yer alan metal grubundadır. Aynı grupta bulunan demir ve nikel ile benzer özellikler gösterir. Atom ağırlığı 58,933, atom numarası 27’dir. Dövülgen bir katılığa sahiptir, metaliktir. Erime noktası 1493°C, kaynama noktası 3100 °C’dir. 300 °C ‘de oksitlenir, oksitlenme kabiliyeti demirden azdır.



Şekil 2.17 Kobalt

Doğada saf kobalt çok nadir bulunur. Bu sebeple bulunması ve işlenerek kobalt elde edilmesi zor işlemler gerektirir. Çeşitli bileşiklerle birlikte çıkarılmakta ve bazı işlemlerin ardından kobalt elde edilmektedir. Örneğin kükürtlü filizler ve arseniğin kavrulma işlemlerinin ardından kobalt elde edilir. Arsenik, demir, nikel, bakır, mangan ve çinko cevherlerinden yan ürün olarak elde edilebilir. Kobaltın rengi ve kimyasal yapısı sebebiyle kullanım alanları da farklılık gösterir. Çeşitli alaşımlarla elde edilen maddeler, birçok ürünün hammaddesi veya katkısı olarak kullanılır. Özellikle batarya, mıknatıs ve elektromıknatıslar, elektrik rezistansları, kesici ve delici aletler, korozyona, aşınmaya ve yüksek ısıya dayanıklı malzemeler ve kaplama materyalleri gibi ürünlerde kobaltın payı vardır. Jet türbinleri, süper alaşımlar, yüksek kapasiteli pil ve bataryalar, renk pigmentleri, petrol ürünleri gibi sektörlerde de kullanımı yaygındır. Kobalttan elde edilen bazı bileşikler de; ateşe dayanıklı boyalarda, seramik ve porselen üretiminde, porselen ve camların renklendirilmesi veya boyanmasında, gübre üretiminde kullanılmaktadır. Kobalt içeren malzemelerin aşınma ve sürtünmeye karşı dayanıklılıkları da artmaktadır. Elmas takımları, çini, cam, çömlek, manyetik malzemeler, emayeler, yağ ve kükürt gidericiler, mürekkep kurutucular, yapıştırıcılar, elektronik malzemeler, video ve fotoğraf kayıt sistemleri, bilgisayar sarf malzemeleri, hayvan besinleri, biyolojik arıtma sistemleri, sterilizasyon işlemleri, radyoaktif izleme işlemleri, kemik cerrahisindeki alaşımlı malzemeler, vida ve cıvatalar, egzoz kanalları, cerrahide kullanılan malzemeler (bıçak, neşter, pens gibi) kobalt içermektedir (Anonim, 2018).

2.5.6. Tungsten karbür-kobalt (WC-Co)

Tungsten Karbür – Kobalt, endüstriyel anlamda 1950’li yıllarda geliştirilmeye başlamıştır. Bu alaşım malzemesi, seramik faz olan Tungsten Karbür ile metalik faz olan Kobaltın bileşiminden elde edilmektedir.

(<https://nanopartikel.info/en/nanoinfo/materials/tungsten-carbide-cobalt/material-information>, 2018). Bu şekilde seramik faz ile metalik fazın bir arada oluşturduğu malzemelere ‘sermet’ malzeme denilmektedir. (https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/materials/cutting_tool_materials/cermet/pages/default.aspx, 2018).

Bu sermet malzeme, içerisinde barındırdığı tozların büyüklüğüne göre özellik değişmektedir. Tane boyutu küçüldükçe kesme ve aşındırma özellikleri artmaktadır. Günümüzde, tanelerin boyutu 0,5 μm ’ye kadar düşürülmüştür. Tane boyutunun yanı sıra içerisine katılan farklı alaşım elementleri ile özelliklerinde büyük değişiklikler elde edilebilmektedir. Halen geleneksel olarak kullandığımız WC-Co sermet malzemesi ortalama 1 μm tane büyüklüğüne sahiptir. İçerisinde %3 ila %11’e kadar kobalt bulunan bu malzeme, % 0,5 krom takviyesiyle birlikte üretilmektedir (Brookes, 2016).

2.5.7. Kesici veya aşındırıcı olarak WC-Co

Endüstriyel ürünlerin makede işlenmesi, üretimde çok önemli bir yer tutmaktadır. Boyutsal ve geometrik gerekliliklerin yanı sıra yüzey özellikleri de çok büyük önem arz etmektedir. Üretilen malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek maksadıyla pek çok büyük firma, çok büyük paralar harcamaktadırlar (Ferreira vd., 2009). Endüstriyel ürünlerin üretimi aşamasında, makinelerin şekillendirici veya kesici uçları, zamanla özelliklerini yitirmekte, bu da ürün kalitesini bozabilmekte, zaman ve para kaybına yol açabilmektedir. Bu nedenlerden ötürü, kesici ya da aşındırıcı bu uçların dayanımını arttırmak için yüzeysel özelliklerini geliştirici bir takım işlemler uygulanmaktadır. Bu işlemlere “ malzemelerin yüzey işlemleri” denilmektedir. Temel olarak çeşitli kaplama yöntemleri, yüzey sertleştirme işlemleri veya difüzyon işlemleri bu tarz uygulamalardır. Günümüzde kesme veya aşındırma amaçlı kullanılan ve kesici uç olarak tabir edilen bu makine elemanları, kullanıldıkları yerlere göre çok daha sert ve aşınma dirençli olmak

zorundadırlar. Bilindiği üzere, yeryüzündeki en sert madde “elmas” olarak güncelliğini korumaktadır. Aynı zamanda aşınma dayanımı açısından da üstün özelliklere sahip olan bu maden, ekonomik açıdan çok değerli olması sebebi ile kullanım maliyeti oldukça yüksektir. Günümüze kadar bu maden kesme veya aşındırma işlemlerinde kullanılmıştır. Teknolojinin gelişimiyle beraber, elmasa alternatif kesme veya aşındırma elemanları geliştirme işlemleri de devam etmiştir. Şu ana kadar elmastan üstün veya eşit özelliklere sahip bir malzeme geliştirilememiş olmakla beraber, elmasa yakın özellik gösteren işleme takımları elde edilebilmiştir. Elmasa en yakın özellikteki bu takımların imalatında günümüzde WC-Co sermet malzemesi kullanılmaktadır. İçerisindeki kobalt miktarı ayarlanarak farklı malzemelerin işlenmesi veya aşındırılması için kullanılmaktadır. Piyasada geçmişten kalan alışkanlıklardan dolayı “elmas uç” olarak adlandırılan bu malzeme, malzeme işlemede kullanılan takım tezgahlarında kesici veya delici uç olarak, tünel kazma araçlarında ise aşındırma amaçlı olarak kullanılmaktadırlar. Bunların yanı sıra, sürekli aşınma altında çalışan makine elemanlarında sürtünen kısımların aşınma dayanımlarını arttırmak için de kullanılmaktadırlar.

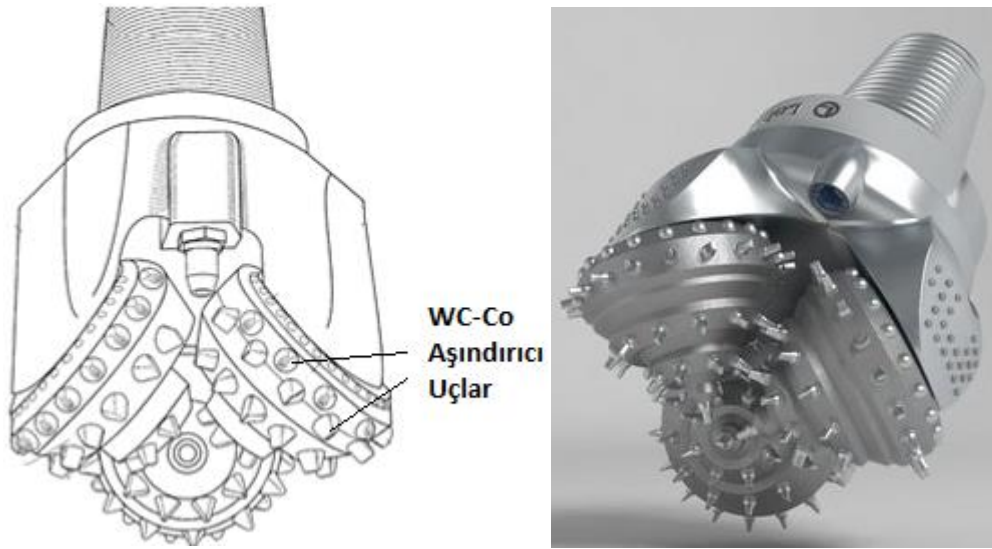
2.5.8. Tünel açma ve delme makinelerinde WC-Co’ın önemi

MÖ 2000 yıllarından beri insanoğlu çeşitli amaçlarla tünel kazmış ve kazmaya da devam etmektedir. Eski Mısır’da madencilik amaçlı, pek çok eski medeniyette şehirlere su taşıma amaçlı, Osmanlılarda düşman hattına sızma amaçlı, günümüzde ise çoğunlukla ulaşım amaçlı olarak tüneller kazılmaktadır.

Modern makinelerin gelişiminden önce tünel kazma işlemleri çoğunlukla el aletleri yardımıyla göz kararı olarak açılmakta idi. Zaman, maliyet ve iş gücü kayıpları günümüzle kıyaslanamayacak kadar yüksekti. Teknolojinin ilerlemesiyle beraber, tünel açma işlemlerinde makineler kullanılmaya başlandı. Bu makineler artık öyle gelişkin hale geldi ki, iki ayrı makine, birisi bir uçtan, diğeri öteki uçtan kazmaya başlayarak, neredeyse sıfır hata ile birbirlerini karşılar hale geldi. Hatta bazı makineler, bir yandan tüneli kazarken, diğer yandan çıkan molozu beton haline getirip, tünelin duvarlarını astarlar hale geldi.

Bu makinelerde kazma görevini yürüten döner başlık üzerinde, farklı açılarda konumlandırılmış aşındırıcı uçlar yer almaktadır. Makinenin tünel açma esnasında pek çok

farklı katmanı aşması gerekmektedir. Zaman zaman oldukça sert katmanlara da denk gelebilen makinenin, aşındırıcı başlığının da bu katmanları ortadan kaldırması gerekmektedir. Bu nedenlerden ötürü, makinenin döner başlığında yer alan aşındırıcı uçlar, WC-Co malzemesinden üretilmektedir (www.bilgiustam.com/tünel-yapimi-ve-gelişimi, 2017; Altınoluk).



Şekil 2.18 Tünel açma ve delmede kullanılan delme başlığı (Anonim, 2018).

2.6. Borlama Kinetiği

Borlama işlemi, daha önceden de açıklandığı üzere, yayılım (difüzyon) yoluyla, borlanacak malzeme ve borlayıcının atomlarının birbiri içerisine karışması ile gerçekleştirilebilen bir çeşit yüzey sertleştirme işlemidir. Bu işlemlerin nasıl olduğunun anlaşılabilmesi için gerçekleştirilen incelemelere ise kinetik incelemeler denilmektedir. Fakat, kinetik incelemenin gerçekleştirilebilmesi için, öncelikle yayılımın ne demek olduğu açıklanmalıdır.

2.6.1. Yayılım (Difüzyon)

Atomların kütle içindeki hareketlerine bağlı bir durum olan yayılım, ısı enerjisi etkisiyle oluşur. Yayılımın oluşabilmesi için, atomların hareket etmesi gerekmektedir. Bu

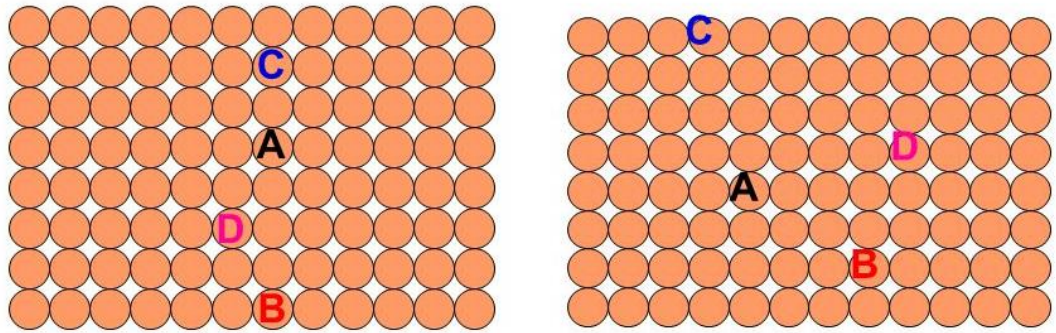
hareket, iki aşamalıdır. İlk aşama, atomların denge konumlarındayken çevrelerinde oluşan titreşimler, ikinci aşama ise, bu titreşimler sonucu mevcut konumlarını terk ederek başka bir denge konumuna doğru gerçekleştirdikleri uzun mesafeli hareketlerdir. Bu şekilde iki aşamadan meydana gelen duruma “atomsal yayılım” veya “difüzyon” denilmektedir (R.Ü. Malzeme Bilgisi Ders Notları: “Atomsal Yayılım” , 2008). Başka şekilde tanımlamak gerekir ise; kimyasal potansiyeli veya konsantrasyonu yoğun olan bölgeden, az yoğun olan bölgeye atom geçişine yayılım denilir (Brandes ve Brook, 1992). Katı, sıvı veya gaz ortamlarda yayılım oluşabilmekle beraber, yayılımın hızı, olduğu ortama göre farklılık göstermektedir. Örneğin; Katıların yayılım hızları, sıvı ve gazlara oranla oldukça yavaştır (R.Ü. Malzeme Bilgisi Ders Notları: “Atomsal Yayılım” , 2008).

2.6.2. Yayılım (Difüzyon) sistemleri

2.6.2.1. Yayılım türleri

Tür açısından yayılım 4 ana başlıkta incelenebilir.

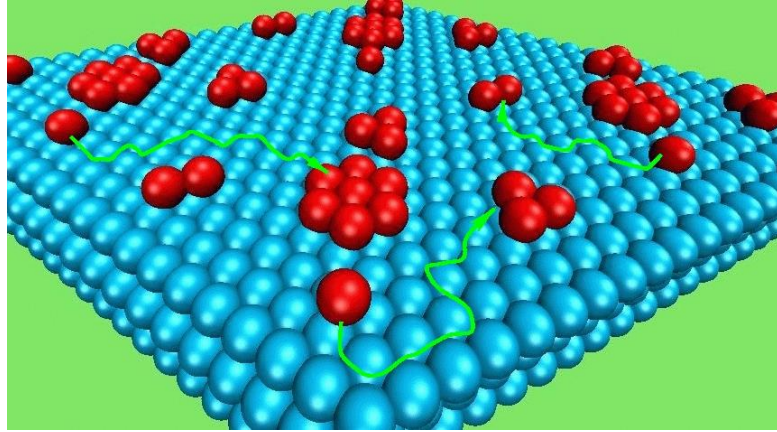
- Kendi kendine yayılım (self difüzyon): Malzemelerin kendi atomlarının, bir kristal kafesten diğerine doğru gerçekleştirdiği harekettir. Bunun için malzemenin saf, düzenli ve katı olması gerekir. Şekil 2.19’da kendi kendine yayılımın şematik resmi yer almaktadır.



Şekil 2.19 Kendi kendine yayılım (şematik) (Anonim, 20018).

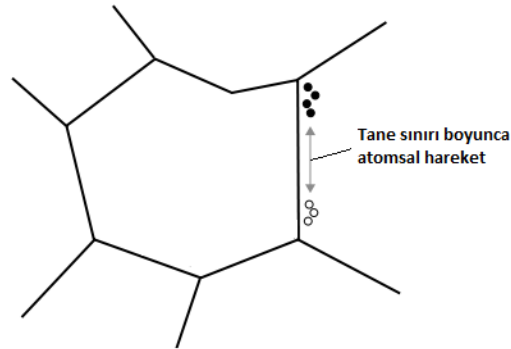
- Hacimsel Yayılım (volumetric diffusion): Kütleli malzemelerde atom hareketlerinin neden olduğu difüzyon türüdür.

- Yüzey Yayılımı (surface diffusion): Fazların yüzeyleri boyunca gerçekleşen atomsal yayımlardır. Yüzey yayılımına ait şematik resim alttaki şekilde yer almaktadır.



Şekil 2.20. Yüzey yayınımları (şematik) (Anonim, 2018).

- Tane sınırı yayınımları (grain boundary diffusion): Malzemelerde, tane sınırları boyunca gerçekleşen atomsal yayınımlardır. Şekil 2.21’de şematik olarak tane sınırı yayınımları gösterilmektedir (<https://malzemebilimi.net/difuzyon-atomsal-yayinim.html>, 2018).

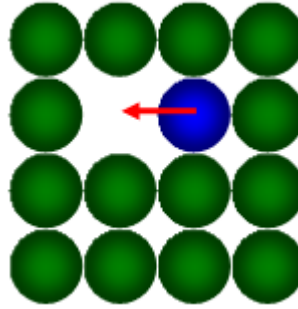


Şekil 2.21 Tane sınırı yayınımları (şematik) (Anonim, 2018).

İşlemsel olarak yayınımlar türleri incelendiğinde ise; temel olarak 3 mekanizma vardır.

- Yeralan Yayınımları (Boşluk Difüzyonu): Kendi kristal kafesi içinde yer alan atomun, komşu kristal kafesteki atomsal boşluğu doldurmasıdır. Atom yerini terkettiği için ardında bıraktığı boşluğu da başka bir atom doldurabilir ve bu döngü bu şekilde devam eder. Bu yayınımlar sisteminde atom çaplarının birbirine yakın boyutlarda olması gereklidir (R.Ü. Malzeme Bilgisi Ders Notları: “Atomal Yayınımlar”, 2008).

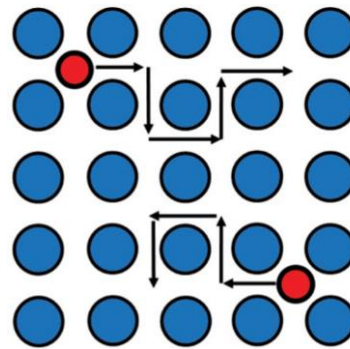
Şekil 2.22’de yeralan yayınıminin şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.22 Yeralan yayınımi (şematik) (Anonim, 2018).

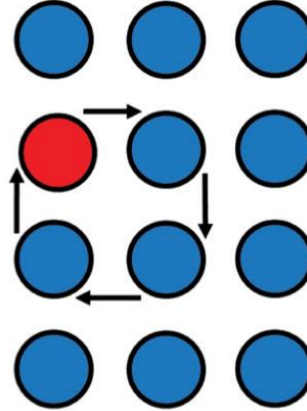
- Arayer Yayınımi: Kristal yapı içerisindeki çapı küçük olan atomun bir ara yerden diğer bir ara yere hareket etmesi sonucu oluşan yayınmaya denir. Diğer bir deyişle, atom çapı büyük olan maddelerin atomları arasına, daha küçük çaplı maddenin atomlarının yerleşmesidir. Örneğin; Hidrojen, karbon, azot, oksijen ve bor gibi atom yarıçapları küçük atomlar ara yer atomudur ve metaller kristaller içerisinde ara yer difüzyon mekanizması ile yayınırlar. Ara yer atomlarının yarıçapları küçük ve bu atomların hızlı hareket etmesinden dolayı ara yer difüzyonu boşluk difüzyonundan daha hızlı gerçekleşmektedir. Karbon, hacim merkezli kübik yapıya sahip demir kristali içerisinde ara yer difüzyon mekanizmasıyla yayınır. (<https://malzemebilimi.net/difuzyon-atomsal-yayinim.html>, 2018).

Şekil 2.23’de arayer yayınıminin şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.23 Arayer yayınımi (şematik) (Musheng vd., 2016).

• Halka Yayınımı: Olasılığı düşük olmakla beraber, birbirine değen atomlar aynı anda ve aynı yönde hareket ederek birbirlerinin yerini alabilirler. Bu tür yayılım çok büyük enerji gerektirdiğinden ancak ergime sıcaklığına yakın bölgelerde oluşabilir. (http://rahmiunal.net/dersler/malzeme/MB_08_difuzyon.pdf, 2018). Şekil 2.24’de halka yayılımının şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.24 Halka yayılımı (şematik) (Musheng vd., 2016).

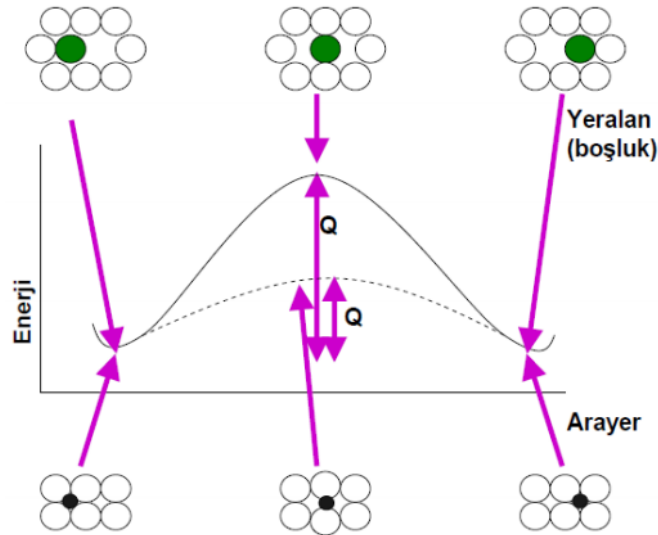
2.6.2.2. Yayınımında aktivasyon enerjisi (Q)

Bir kimyasal reaksiyonun başlaması için gerekene minimum enerjiye “aktivasyon enerjisi” denir. Kimyasal tepkimelerin gerçekleşmesi için belirli bir enerji düzeyine ihtiyaç vardır. Bu enerji düzeyi sağlandığında tepkime gerçekleşmeye başlar. Tepkime endotermik ise ısı alarak ilerler. Tepkime ekzotermik ise de ısı açığa çıkarır. Ancak her iki durumda da tepkimenin başlaması için minimum bir ısıya ihtiyaç vardır (<http://webders.net/670/aktivasyon-enerjisi-nedir.html>, 2018). Başka bir deyişle, Hareket halindeki bir atom, yerleşeceği yere ulaşmak için etrafındaki atomları sıkıştırarak ilerlemek zorundadır. Bunun için de enerjiye ihtiyaç duyar. Bu enerjiye aktivasyon enerjisi denilir ve “Q” ile gösterilir. Aktivasyon enerjisinin ortaya çıkabilmesi için ise; atomun ısıtılması gerekir (R.Ü. Malzeme Bilgisi Ders Notları: “Atomsal Yayınım”, 2008). Yayınımın gerçekleşmesi için çeşitli şartlar vardır. Örneğin reaksiyona giren maddelerin uygun geometride çarpışması gerekir. Bununla birlikte tepkimenin gerçekleşmesi için çarpışan moleküllerin aktivasyon enerjisini de geçmesi gerekir. Reaksiyona giren ve çıkan maddelerin potansiyel enerjileri arasında bir bariyer vardır. İşte bu bariyerin bir sonucu olarak aktivasyon enerjisi kavramı karşımıza çıkar. “Aktivasyon enerjisi” terimi İsveçli

bilim adamı Svante Arrhenius tarafından 1889'da ifade edilmiştir. Arrhenius denklemi aktivasyon enerjisini, bir kimyasal reaksiyonun ilerlediği hız ile ilişkilendirir. Buna göre;

$$K = K_0 \exp(-Q/RT) \quad (2.3)$$

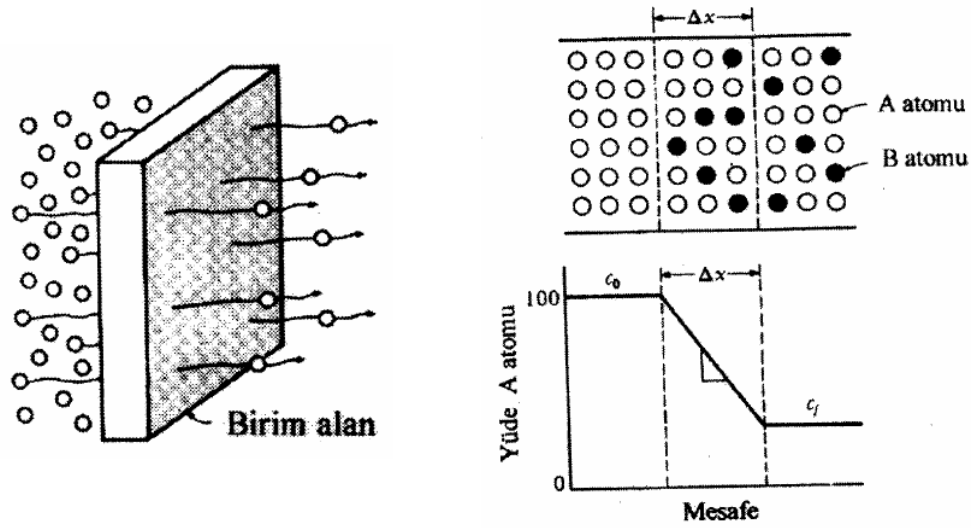
eşitliği bulunmuştur. Burada “K” reaksiyon hızı katsayısı, “K₀” reaksiyonun frekans faktörü, “e” irrasyonel bir sayı (yaklaşık 2.718'e eşittir), “Q” aktivasyon enerjisi, “R” evrensel gaz sabiti ve “T” Kelvin cinsinden mutlak sıcaklıktır. Arrhenius denklemi kullanılarak reaksiyon gerçekleşme oranının sıcaklığa göre değiştiği görülebilir (<http://webders.net/670/aktivasyon-enerjisi-nedir.html>, 2018; Topuz, 2009).



Şekil 2.25 Aktivasyon enerjisinin difüzyon sistemindeki oluşumu (şematik) (Özdemir, 2018).

2.6.2.3. Difüzyon hızı (J)

Difüzyonun hızının ne olduğunu anlamak için 1.Fick kanunu incelenmelidir. Malzemelerin atomlarının difüzyon esnasındaki hızları, birim düzlem alanı boyunca, birim zamanda içinden geçen atom sayısı olarak tanımlanabilir ve bu da, akı (J) ile ölçülebilir (Askeland ve Phuille’).



Şekil 2.26 Difüzyon Mekanizması (R.Ü. Malzeme Bilgisi Ders Notları: “Atomal Yayınım”, 2008).

$$J = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

J : Atomal yayınım akısı (atom/(m²s))
 D : yayınım katsayısı (m²/s)
 c : atom konsantrasyonu
 $\Delta c / \Delta x$: konsantrasyon gradyanı

2.6.2.4. Difüzyon katsayısı (D)

Difüzyon katsayısı; 1 saniyede, 1 cm²'lik yüzey alanından geçen atom sayısı olarak ifade edilebilir (Güner, 2014). Bu katsayısı, sıcaklık, difüzyon türü ve difüzyon yapısına bağlıdır. Difüzyon katsayısını tanımlamak için Arrhenius Denklemi kullanılır. Bu denklem $D = D_0 \exp(-Q/RT)$ ile ifade edilmektedir. Buna göre; “Q” aktivasyon enerjisi değerini, “R” gaz sabiti değerini, “T” mutlak sıcaklık değerini ve “D₀” ise frekans faktörü değerini ifade etmektedir (Thelning, 1975).

2.6.2.5. Difüzyon mesafesi (x)

Difüzyon mesafesinin bulunmasında, 2. Fick Kanunu kullanılmaktadır. 2. Fick Kanunu, atomların dinamik ve durağan olmayan hallerini için kullanılır. Bu kanuna göre;

$$dc/dt = D(d^2c/dx^2) \quad (2.4)$$

denklemini oluşturmaktadır. “D” (difüzyon katsayısı) sabit kaldıkça, değişik şartlarda aynı yoğunluk profili elde edilebilir. Bu özellik, difüzyon işlemin uygulanması için gerekli zaman üzerine sıcaklığın etkisini belirlemeyi sağlar (R.Ü. Malzeme Bilgisi Ders Notları: “Atomal Yayınım” , 2008), (Thelning, 1975).

Yoğunluk profili ele alınır;

$$\frac{C_x - C_m}{C_1 - C_m} = \text{erf} \frac{x}{2(Dt)^{1/2}} \quad (2.5)$$

denkleminde ulaşılır. Burada,

C_x = t zaman sonra orijinal yüzeyden bir x mesafesinde 2. malzemede A atomunun yoğunluğu

C_m = 1. ve 2. malzemedeki A atomunun ortalama yoğunluğu

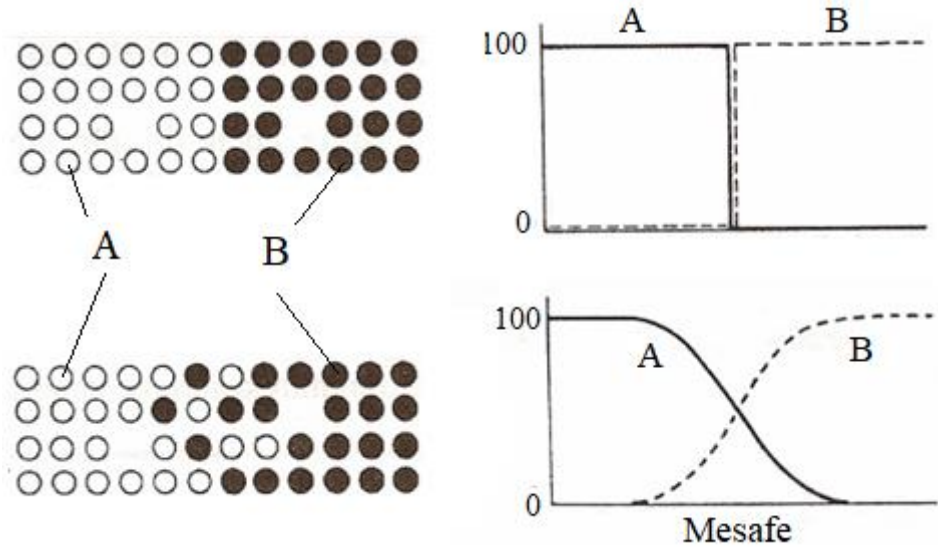
C_1 = 1. malzemedeki A atomunun yoğunluğu

D = 2. malzemede A atomunun difüzyon katsayısı

x = Difüzyon mesafesi (cm)

t = Difüzyon (yayınma) süresi (s)

erf = hata fonksiyonunu ifade etmektedir.



Şekil 2.27 Difüzyon mesafesi

Difüzyon profili ele alınırsa;

$$C(x,t) - C_0 / C_s - C_0 = 1 - \text{erf}(x/2\sqrt{Dt})$$

(2.6)

denkleminde ulaşılmaktadır (R.Ü. Malzeme Bilgisi Ders Notları: “Atomal Yayınım” , 2008), (Brandes ve Brook, 1992), (Thelning, 1975).

$C(x,t)$ = Yüzeyin altında “x” derinliğindeki gerekli olan bor konsantrasyonu

C_0 = Borlanan Malzemenin esas bor miktarı

C_s = Borlanan malzemenin yüzeyindeki bor miktarı

D = Difüzyon katsayısı (cm^2/sn)

x = Difüzyon mesafesi (borür tabaka kalınlığı)(cm)

t = Borlama süresi (sn.)

Bu denklem, sadeleştirildiğinde;

$C(x,t) = C_s \text{erf}(x/2\sqrt{Dt})$ denkleminde ulaşırlar. Buna göre, $x = 2\sqrt{Dt}$ olmaktadır (R.Ü. Malzeme Bilgisi Ders Notları: “Atomal Yayınım” ,2008). Fakat çeşitli bilim adamlarının gerçekleştirdiği çalışmalar sonucunda, birbirinden farklı matematiksel sonuçlar ortaya çıkmıştır. Mesela Einstein, difüzyon mesafesinin “ $\sqrt{2Dt}$ ” olduğunu (Thelning, 1975), (Liv d., 2005; Melendez vd., 1997) bazı bilim adamları da “ \sqrt{Dt} ” olduğunu savunmuşlardır

(Efe vd., 2008). Bu 3 farklı yaklaşım nedeniyle, difüzyon mesafesi ve süresine bağlı olarak “ $x=\sqrt{K.t}$ ” eşitliği kullanılmaya başlanmıştır.

Buna göre; tabaka büyüme hızı için bir sabit değer oluşturulmuş ve buna da “K” (tabaka büyüme hız sabiti) denilmiştir. Böylelikle, denklem “ $x^2=K.t$ ” halini almıştır. Bu denkleme göre, difüzyon mesafesi (x) ve süresi (t) bilindiği takdirde, “ x^2-t ” diyagramı ve bu diyagramdan elde edilen eğim, her farklı difüzyon sıcaklığı için tabaka büyüme hız sabitini (K) vermektedir. Ayrıca, bu sabit kullanılarak, Arrhenius denklemi ($D = D_0 \exp(-Q/RT)$), $K = K_0 \exp(-Q/RT)$ ’ye dönüştürülebilmektedir (Karaman, 2003), (Ozdemir vd., 2009). Denklem açıldığında, $\ln K = \ln K_0 - Q/RT$ denkleminde ulaşılır. Bu denklem ışığında, “ $\ln K-1/T$ ” diyagramı çizilebilir ve eğimi “Q/R” değerini verirken, ordinatın keşiştiği nokta ise “ $\ln K_0$ ” değerini vermektedir. Sonuç olarak, “ $x^2=K.t$ ” denkleminde, bilinenler değerler yerlerine konularak “ $x^2= t.K_0 e (-Q/RT)$ ” denklemi oluşur. Böylece, aktivasyon enerjisi değeri (Q), evrensel gaz sabiti (R) ve reaksiyon frekans faktörü (K_0) yerlerine konarak difüzyon sıcaklık ve süresinin değişimine bağlı olarak difüzyon mesafesi (x) bulunabilir (Ozdemir vd., 2009; Sen, 2004; Sen vd., 2005).

2.6.2.6. Kırılma tokluğu

Katı bir cismin, çeşitli gerilmelere maruz kalması ile iki ya da daha fazla parçaya ayrılmasına “kırılma” denilmektedir. Kırılma karakteri malzemedeki malzemeye değişmekle birlikte, genellikle maruz kaldığı gerilme, sıcaklık ve deformasyon hızına göre değişir. Kırılma temel olarak iki safhadan oluşmaktadır. İlk safha “çatlak oluşumu” diğer safha ise “çatlağın ilerlemesi” dir. Kırılmanın, enerji ile ilgisini ilk inceleyen kişi Griffith’dir. Griffith’e göre; kırılma meydana geldiğinde açığa çıkan enerjinin hızı, kırılma tokluğu ölçüsü olan kritik enerji yayılım hızına eşittir. Buna göre, gevrek bir malzemede çatlak bulunması halinde, malzemenin kırılmadan dayanabileceği gerilmeyi tespit etmek mümkündür. Griffith bu gerilmeyi tespit etmek için ilk bağıntıyı geliştirmiştir. Buna göre;

$$\sigma_k = \sqrt{2\gamma/\pi a} \quad (2.7.)$$

σ_k = Kırılma Enerjisi

γ = Yüzey Enerjisi

E = Elastisite Modülü

a = Çatlak boyu

Griffith bağıntısı, cam ve gevrek cisme yakın malzemelerde gerçeğe yakın değerler vermektedir, ancak metalik malzemelerde şekil değişimi kalıcı olmaktadır. Dolayısıyla Griffith'in ortaya koyduğu kriterde serbest kalan enerji, yeni yüzeyler oluştururken kalıcı şekil değişimi içinde harcanmaktadır. Kalıcı şekil değişimi her malzeme için farklılık gösterir. Bu nedenle Griffith'in enerji yaklaşımı metalsel malzemelere doğrudan uygulanmaz. Bu konuda Irwin ve arkadaşları, Griffith'in yaklaşımına eklemeler yapmışlardır. Onlar analizlerinde çatlağın ucu civarındaki gerilme durumunu esas almışlardır. Çatlak ucu civarındaki gerilmelerin hesaplanmasından, bir gerilme şiddet faktörü “ K ” parametresi geliştirmişlerdir. Gerilme şiddet faktörü “ K ” uygulanan gerilmenin, çatlağın boyut ve şeklinin ve bir geometrik faktörün fonksiyonudur. Bunun haricinde çatlağın ilerlemesi için gerekli enerjinin olabilecek tüm enerji değişimlerine etki ettiğini belirlemiş ve “kritik deformasyon enerjisi” (G_c) terimini kullanmışlardır. Buna göre Griffith Denklemi;

$$\sigma_k = \sqrt{EG_c/\pi a} \quad (2.8.)$$

şeklini almıştır. Böylelikle gerilme şiddet faktörü olan “K”, kritik bir değere geldiğinde kırılma gerçekleşmektedir. Bu kritik değere de “kırılma tokluğu” (K_c) denilmektedir. Buna göre;

$$K_c = E \cdot G_c \quad (2.9.)$$

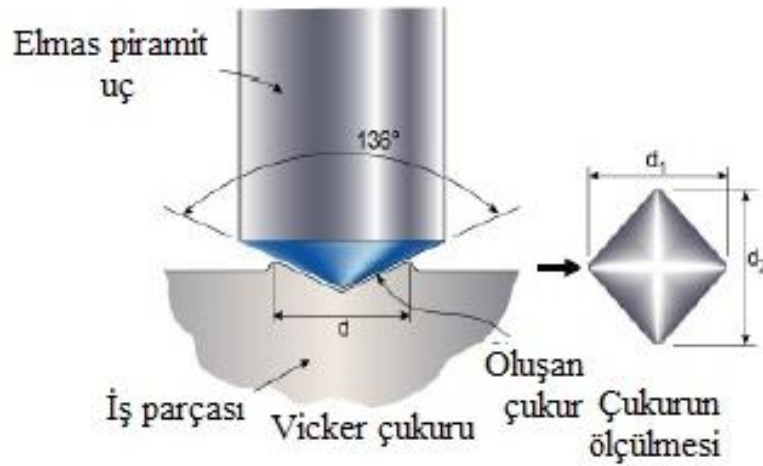
formülü elde edilmektedir (Ukadgaonker, 2013).

Belirli bir yük altında çalışan malzemenin çatlaması ve bu çatlağın ilerlemesine karşı gösterdiği direncin sayısal olarak ifadesine “kırılma tokluğu” adı verilmektedir. Kırılma tokluğu ne kadar yüksek olursa malzemeler çatlamaya, dolayısıyla kırılmaya daha dirençli olurlar. (Salim, 2018).

Kırılma tokluğu, birim olarak MPa.m^{1/2} ile gösterilmektedir. Örnek vermek gerekirse; bakırın kırılma tokluğu 100 MPa.m^{1/2}' in üzerinde iken, yüksek karbonlu bir çeliğin kırılma tokluğu yaklaşık 50 MPa.m^{1/2}' dir. Buradan da anlaşılacağı üzere kırılma tokluğu, malzemelerin sertliği ve sünek – gevrek özellikleri ile doğrudan alakalıdır.

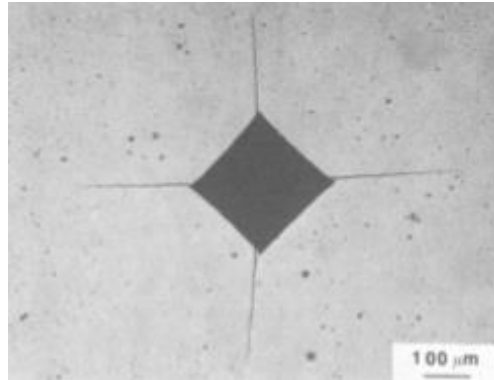
Kırılma tokluğu hesaplamalarında çeşitli deneysel yöntemlerin yanı sıra, çeşitli formülasyonlarda kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi de, malzemelerin sertlik ölçümleri ile elde edilen veriler ışığında kırılma tokluğunun hesap edilmesidir. Bu yöntem genellikle diğer yöntemlerin uygulanamadığı durumlarda kullanılmaktadır. Diğer yöntemlerin uygulanamamasının malzeme boyutlarının uygun olmaması veya faz yapılarındaki farklılıklar gibi sebepleri vardır. Sertlik ölçme yöntemleri yardımıyla gerçekleştirilen kırılma tokluğu hesaplamalarında, birçok araştırmacının birbirinden farklı formüller geliştirdiği görülmektedir. Fakat hepsinin temeli, kırılma tokluğu tespit edilecek olan malzemenin, sertliği ölçülürken, dayanma limitlerinin daha üzerinde bir kuvvete maruz bırakılması ve yüzeyinde mikron metre mertebesinde bir çatlak oluşturulması, bu çatlak boyutlarının da hesaplamalarda kullanılması ile çeşitli formülasyonlarla sonucun elde edilmesi prensibine dayanmaktadır.

Literatür incelemelerinde, “WC” gibi sinterlenmiş malzemelerin, yüksek sertlikleri dolayısıyla, kırılma tokluğu değerlerinin tespiti için sertlik ölçümünden elde edilen formüller kullanılmaktadır. Kırılma tokluğu hesaplamalarında kullanılan sertlik ölçme yöntemi “Vickers” yöntemidir (Spiegler vd., 1990). Bu yöntem, uç açısı sabit 136° olan elmas piramit şeklindeki baskı ucunun, belirli bir kuvvet ile malzeme yüzeyine bastırılması, bu baskı sonucunda malzeme yüzeyinde oluşan izin (eşkenar dörtgen) köşegenleri arasındaki mesafenin ölçülmesi ve formüldeki yerine konulması ile sonucun bulunması esasına dayanmaktadır (TS EN ISO 6507-1).



Şekil 2.28 Vickers setlik ölçüm gösterimi (şematik)

Vickers ile kırılma tokluğu hesaplamalarında, uygulama açısından bir farklılık bulunmamakla birlikte, uygulanacak olan yükün, oluşacak izin köşegenlerinde çatlak oluşturmasına izin verecek ağırlıkta olması gerekmektedir.



Şekil 2.29 Vickers ölçüm izi (Shetty vd., 1985).

Vickers ile yapılan kırılma tokluğu çalışmalarını birden çok kişi gerçekleştirmiştir. Bunlardan ilki ve kendi adını taşıyan yöntem olan "Palmqvist", Vickers izinin köşegenlerinde başlayan çatlakların uzunluğunu ölçerek formüle etmiştir (Palmqvist, 1957).

$$A = 0,0649 (Pk) (Pk/Hv)^{1/2}$$

A= Çatlak oluşturmak için gerekli kritik iş

HV= Vickers Sertliği (kg/mm²)

Pk= Başlangıç Yükü

Bir diğer metot ise, Dawihl ve Altmeyer'in uyguladığı metottur. Onlar, oluşan çatlakların uzunluğunun yanı sıra, parça yüzeyinde oluşan artık gerilmeleri de hesaba katmışlardır (Dawihl ve Altmeyer, 1964).

Exner isimli diğer bir bilim adamı ise, oluşan izin, bütün köşegenlerindeki çatlakların toplam uzunluğu ile uygulanan kuvvet arasındaki doğrusal ilişkiden yola çıkararak hesaplama yapmıştır (Exner, 1969).

Gerçekleştirilen literatür araştırmaları sonucu borür tabakalarının kırılma tokluğunda kullanılan formülünün aşağıdaki gibi olduğu anlaşılmıştır (Anstis vd., 1981).

$$Kc = 0,016 (E/Hv)^{1/2} P/c^{3/2}$$

Kc : Kırılma tokluğu (MPa.m^{1/2})

E: Elastisite modülü (kg/mm²)

Hv: Kaplama tabakasının Vickers sertliği (kg/mm²)

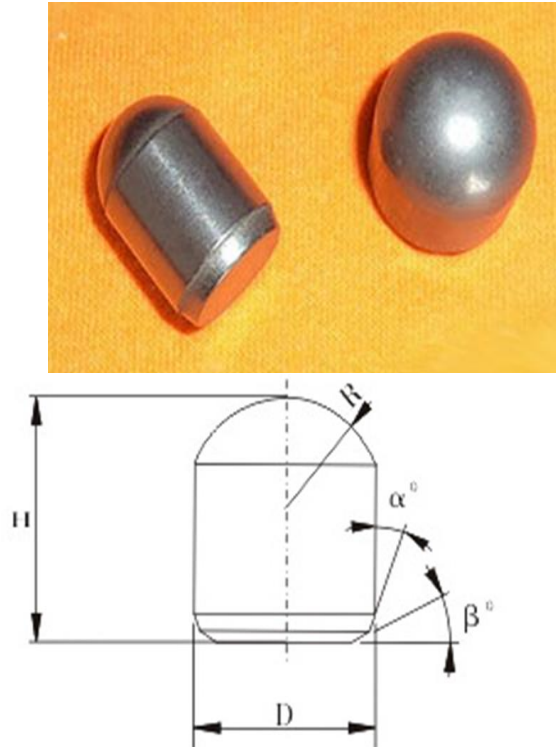
P: Uygulanan yük (MN)

c: Çatlak yarı boyu (m)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deneyleerde Kullanılan Malzeme Ve Cihazlar

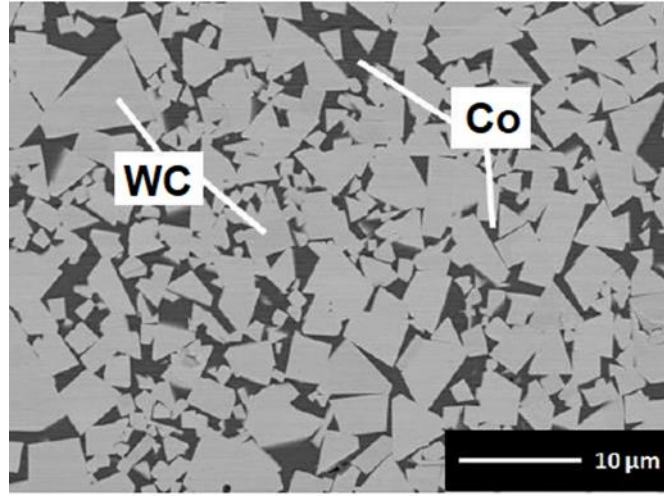
Bu doktora çalışmasında, sondaj veya tünel açma makinalarında aşındırıcı başlıkta yer alan WC-Co uçların borlanması ile aşınma performansına etkisi incelenmiştir. Deneyleer için mermi çekirdeğine benzer şekilli üretilmiş uçlar kullanılmıştır.



Şekil 3.1 Borlama deneyleerinde kullanılan WC-Co düğme uç

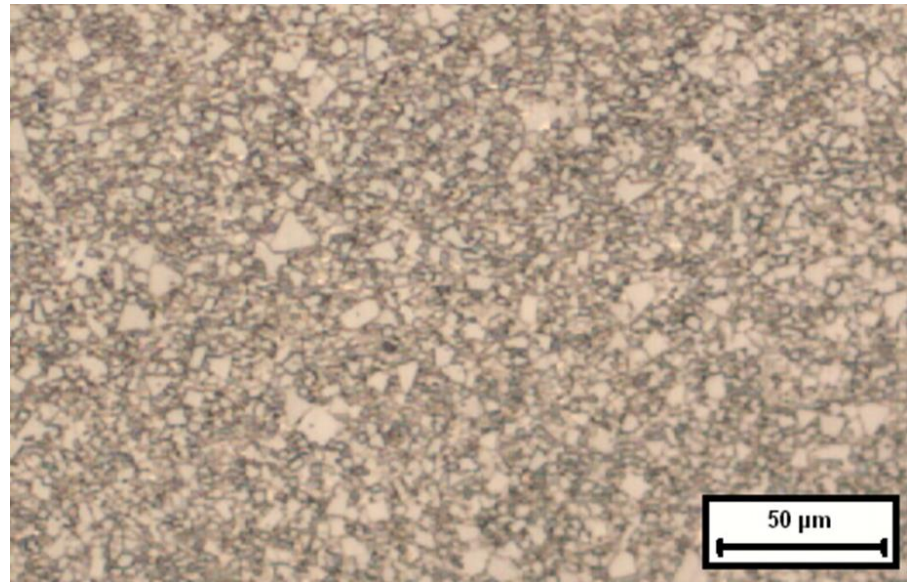
Deneyleere başlamadan önce, temin edilen numunelerin doğruluğunu anlamak amacıyla mikroyapı ve EDX analizi gerçekleştirilmiştir.

WC-Co malzeme toz metalürjisiyle üretildiği için, mikro yapısal olarak taneler birbirinden ayrışabilmektedir. Şekil 3.2'den de görülebileceği üzere, WC tozları açık renkli, Co tozları ise koyu renkli olarak belirginleşmiştir.



Şekil 3.2 WC-Co malzemenin literatürden mikroyapısı (Marek vd., 2015).

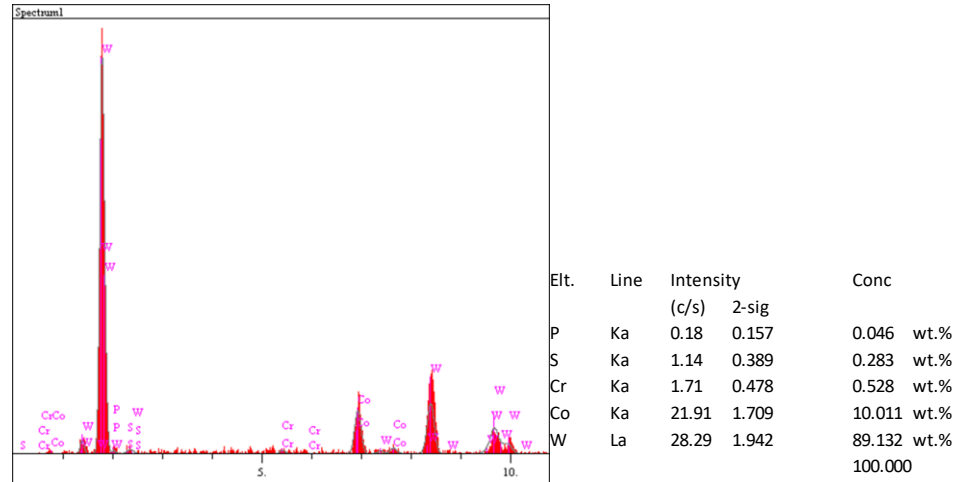
Şekil 3.3’de deneylerde kullanılan WC-Co uçların mikro yapısı yer almaktadır. Burada da açık ve koyu renkli olarak bu ayrım göze çarpmaktadır. Bunun yanı sıra toz karışımının homojen olduğu da görülmektedir.



Şekil 3.3 Deneylerde kullanılan WC-Co’ın mikroyapısı

Resimde de görülebileceği üzere WC tozları açık renkli, Co tozları ise koyu renkli olarak belirginleşmiş, karışımın da homojen olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan uçların

analizi amacıyla SEM'e entegre EDX ünitesi yardımıyla yüzey analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda malzemenin yaklaşık % 90 W, %10 Co içerdiği belirlenmiştir. Analiz sonucu şekil 3.4'de yer almaktadır.



Şekil 3.4 W-Co Analiz sonucu

Borlama deneyleri sonrası numunelerin son halini gösterir örnek resim Şekil 3.5'de yer almaktadır.



Şekil 3.5 Borlanmış WC numuneler

Borlama deneyleri tamamlanan numunelerin borür tabakası kalınlık ölçümleri, tabaka sertlikleri, kimyasal analizleri, kırılma tokluğu ölçümleri ve son olarak da aşınma

deneyleri gerçekleştirilmiş ve literatürle karşılaştırmaları, olumlu ve olumsuz açıdan belirlenmiştir.

Borür tabakası mikroyapı incelemeleri ve tabaka kalınlığı ölçümleri için dijital kamera ve görüntü analiz programına sahip bilgisayara bağlı optik mikroskop kullanılmıştır.



şekil 3.6 Optik mikroskop ve bilgisayarı

Tabaka sertliklerinin belirlenmesi ve kırılma tokluklarının hesaplanması için Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri için kullanılan cihaz alttaki şekilde yer almaktadır.



Şekil 3.7 Vickers sertlik ölçme cihazı

Ayrıca tabaka morfolojisi ve fazı oluşturan elementlerin tespiti amacıyla tarama elektron mikroskobu (SEM) ve buna entegre EDX analiz cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.8 JEOL Marka JSM 5410 LV Tarama Elektron Mikroskobu ve EDX ünitesi

JEOL JSM 5410 LV Elektron Mikroskobu, hem yüksek, hem de düşük vakumda inceleme yapmaya izin veren bir mikroskop modelidir. Aynı zamanda geri saçılan elektron dedektörü sayesinde elementlerin veya birbirinden farklı fazların görsel olarak ayırt

edilebilmesini de sağlayabilmektedir. 25 ila 200000 büyütme arasında değişen büyüklükleri 0,5 ila 30 Kv arasında incelemeye imkan tanımaktadır. Cihaza entegre EDX ünitesinde kullanılan silikon dedektör ve düşük voltajla çalışma imkanı sayesinde hafif elementlerden olan bor'un tespiti de mümkün olmuştur. (http://www.dosem24hr.com/images/column_1329896384/Jeol%20Scanning%20electron%20microscope%20JSM%205400.pdf- erişim 30.01.2019).

Borlama deneyleri tamamlanan numunelerin, yüzeylerinde oluşmuş olan borür tabakasının mikroyapısal incelenmesi için geri saçılan elektronlar kullanılarak, tabakaların görüntüleri ayrıntılı bir şekilde elde edilebilmiştir.

Numunelerin yüzeyinde oluşan borür tabakasını meydana getiren fazların tayini için XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler için YTÜ Kimya Metalurji Fakültesi'nde bulunan Philips Panalytical X-Pert Pro cihazı kullanılmıştır. Analiz verileri, toz numunelerinin 1.5418 Å karakteristik dalga boyuna (λ) sahip Cu-K α X-ray radyasyona maruz bırakılmasıyla elde edilmektedir (<https://studyres.com/doc/19428546/information-about-the-panalytical-x-pert-pro-multipurpose-> erişim 30.01.2019).



Şekil 3.9 XRD cihazı

3.2. Deneylerde Kullanılan Fırının Özellikleri

Borlama deneyleri için Protherm Marka, PLF 140-160 model, yüksek sıcaklık laboratuvar fırını kullanılmıştır. Borlama deneylerinde kullanılan ve max. 1600° C sıcaklığa kadar işlem yapmaya uygun olan fırın aşağıda şekilde yer almaktadır.

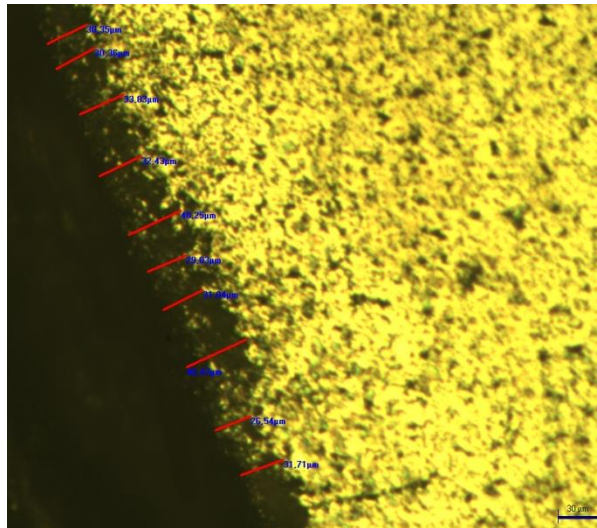


Şekil 3.10 Isıl işlem fırını

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

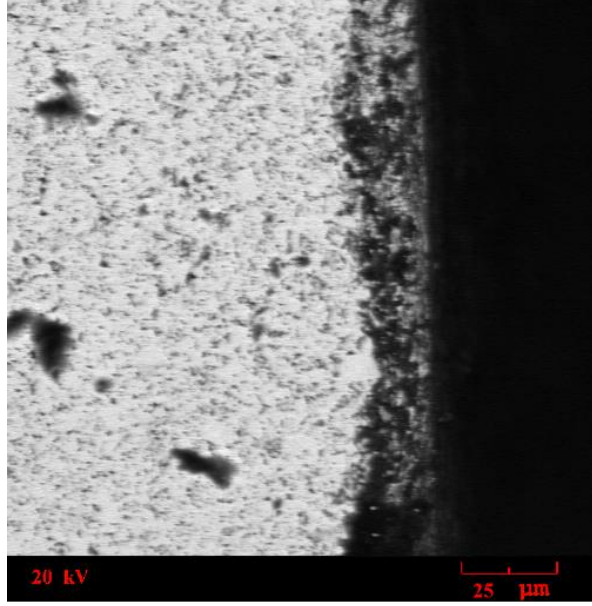
4.1. Borlama İşlemi Sonucu Oluşan Tabakaların Mikroyapı İncelemeleri

Borlama deneylerinde, %90 WC ve %10 Co bileşiminden üretilmiş uçlar kullanılmıştır. Atmosfer kontrollü fırında, kutu borlama yöntemiyle yapılan deneyler, 900 – 1000 ve 1100 °C sıcaklıklarda, 1- 2 ve 3 saat süreler ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, parçaların yüzeyinde oluşmuş olan borür tabakalarının ortalama kalınlıkları belirlenmiştir. Hem optik mikroskop, hem de SEM yardımıyla yapılan ölçümler, en az 10 farklı bölgeden alınan ölçümlerin ortalamasıdır.

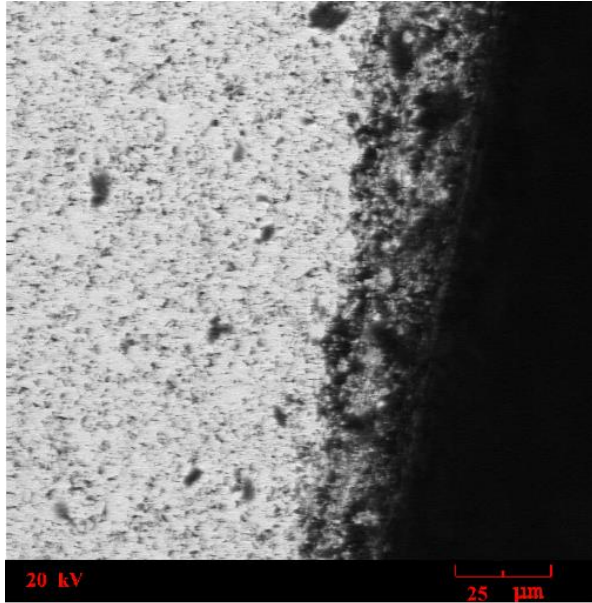


Şekil 4.1 Ortalama tabaka kalınlığının bulunması

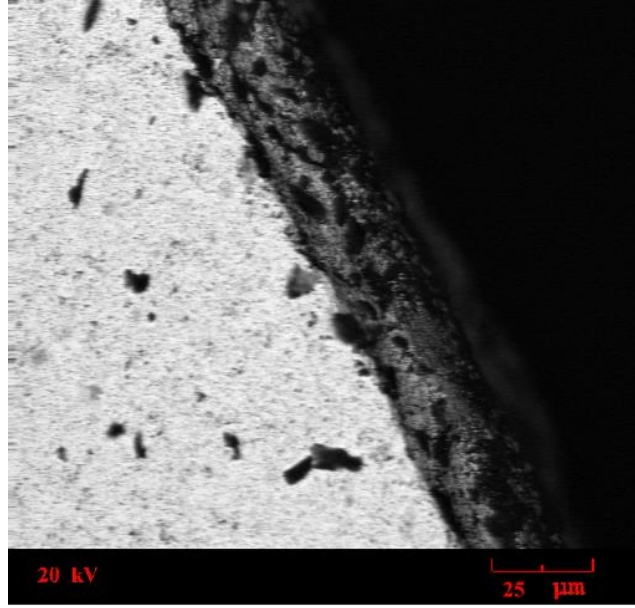
Tarama Elektron Mikroskopunda Geri Saçılan Elektronlar yardımıyla elde edilen görüntüler altta sırasıyla yer almaktadır.



Şekil 4.2 900 °C’de 1saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.

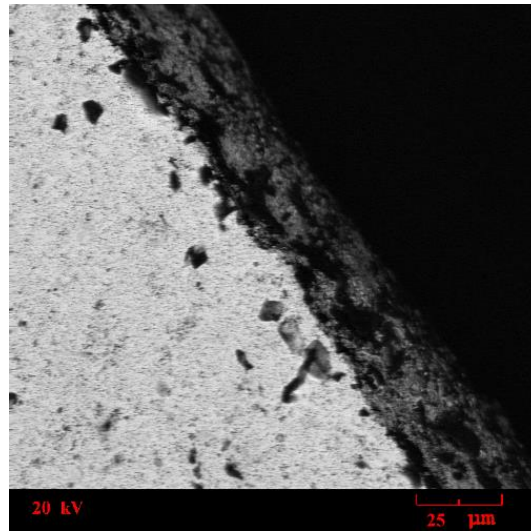


Şekil 4.3 900 °C’de 2 saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.

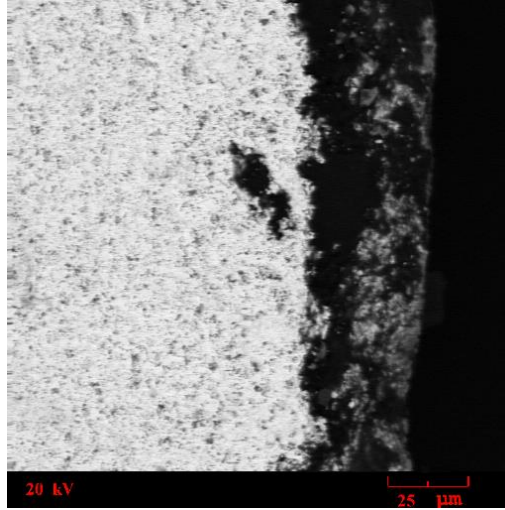


Şekil 4.4 900 °C’de 3 saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.

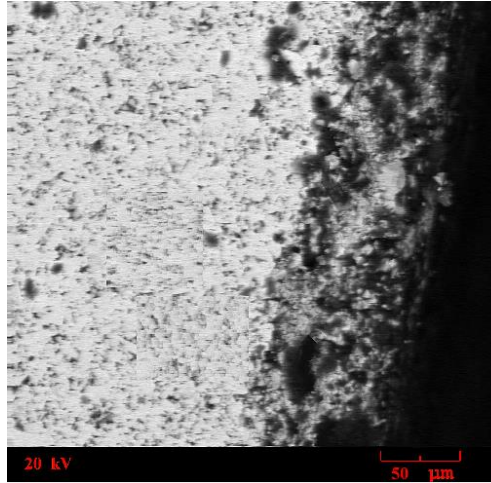
900°C’de borlanmış olan numuneler incelendiğinde, zamanın artışına bağlı olarak tabaka kalınlıklarında da artış meydana gelmiştir. 1 saat süreyle borlanmış numunede oluşan tabaka ortalama 15 μm kalınlığında iken, bu ortalama 3 saatlik numune de yaklaşık 25 μm kalınlığa ulaşmıştır.



Şekil 4.5 1000 °C’de 1 saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.

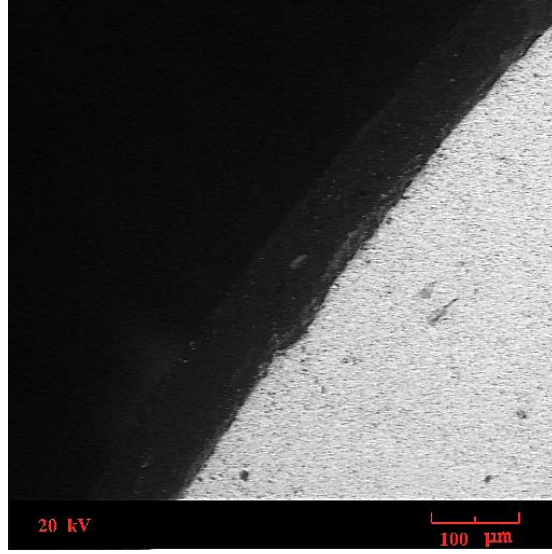


Şekil 4.6 1000 °C'de 2 saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.

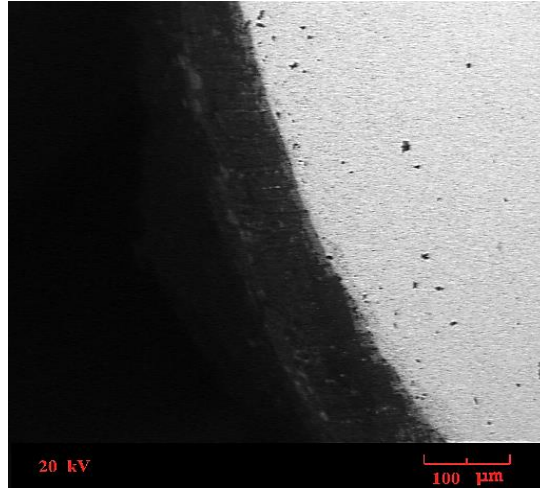


Şekil 4.7 1000 °C'de 3saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.

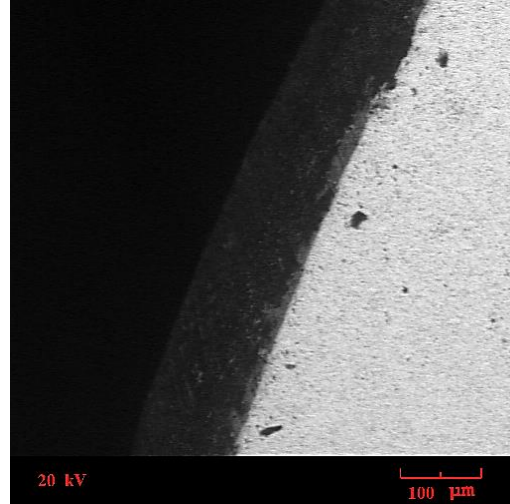
1000 °C'de borlanmış olan numuneler incelendiğinde, 900 °C'de olduğu gibi zamanın artışına bağlı olarak tabaka kalınlıklarında da artış meydana gelmiştir. 1 saat süreyle borlanmış numunede oluşan tabaka ortalama 30 μm kalınlığında iken, bu ortalama 3 saatlik numune de yaklaşık 70 μm kalınlığa ulaşmıştır.



Şekil 4.8 1100 °C’de 1 saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.



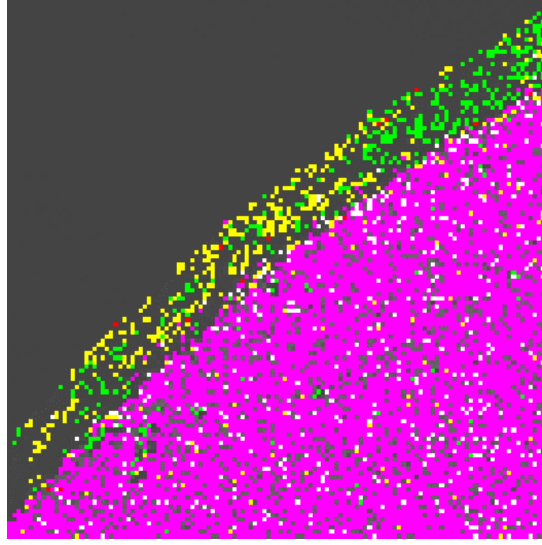
Şekil 4.9 1100 °C’de 2 saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.



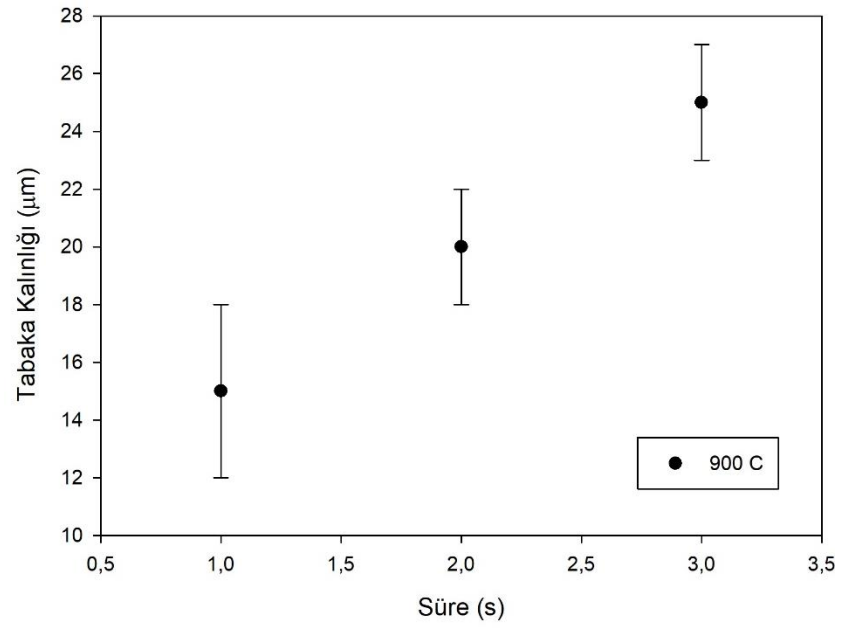
Şekil 4.10 1100 °C’de 3 saat süre ile borlanmış numunenin SEM (BEI) mikrografı.

1100 °C’de borlanmış olan numuneler incelendiğinde, 900 °C ve 1000 °C’de olduğu gibi zamanın artışına bağlı olarak tabaka kalınlıklarında da artış meydana gelmiştir. 1 saat süreyle borlanmış numunede oluşan tabaka ortalama 90 μm kalınlığında iken, bu ortalama 3 saatlik numune de yaklaşık 110 μm kalınlığa ulaşmıştır.

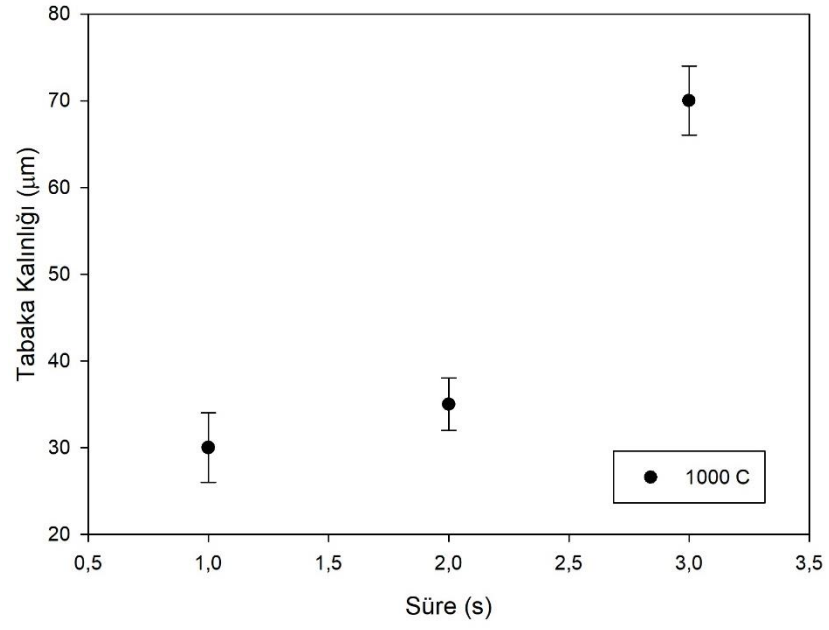
Tabaka kalınlıklarından da anlaşılacağı üzere, zamanın artışı kalınlığın artmasına yol açmakla birlikte, sıcaklığın artışı da tabaka kalınlığını arttırmaktadır. SEM incelemeleri esnasında, tabakayı oluşturan elementlerin görsel tespiti amacıyla EDX ünitesi kullanılarak haritalama yaptırılmıştır. Haritadan da görülebileceği üzere, tabaka ile ana malzeme ayrımı çok net bir şekilde gözükmektedir. Pembe - beyaz renkle temsil edilen WC-Co malzemenin borür tabakası yeşil – sarı renkle birbirinden ayrılmıştır.



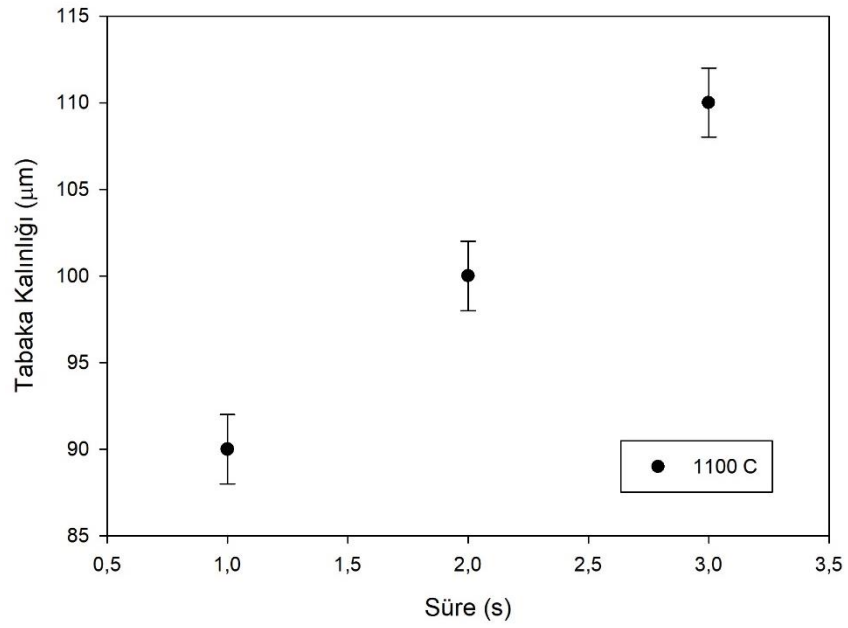
Şekil 4.11 Borür tabakasının EDX yüzey harita resmi



Şekil 4.1. 900 °C’de borlanmış numunelerin tabaka kalınlıkları

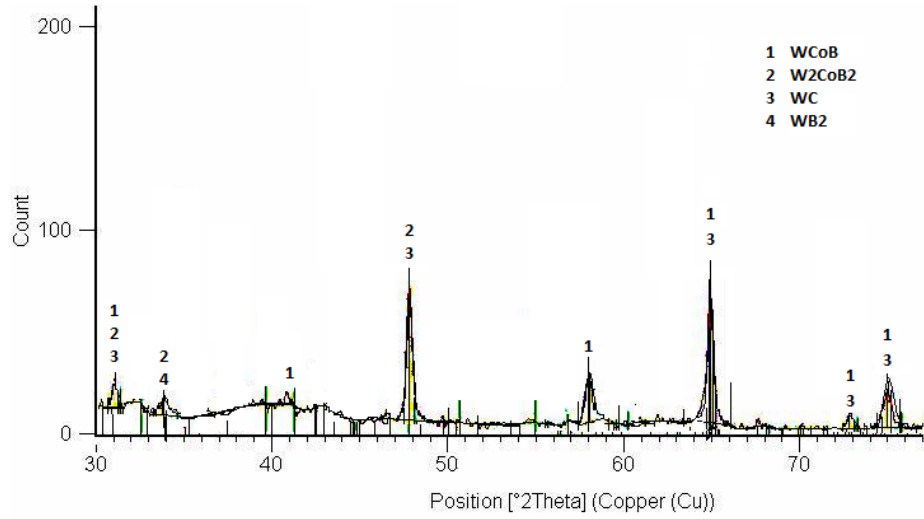


Şekil 4.13 1000 °C’de borlanmış numunelerin tabaka kalınlıkları

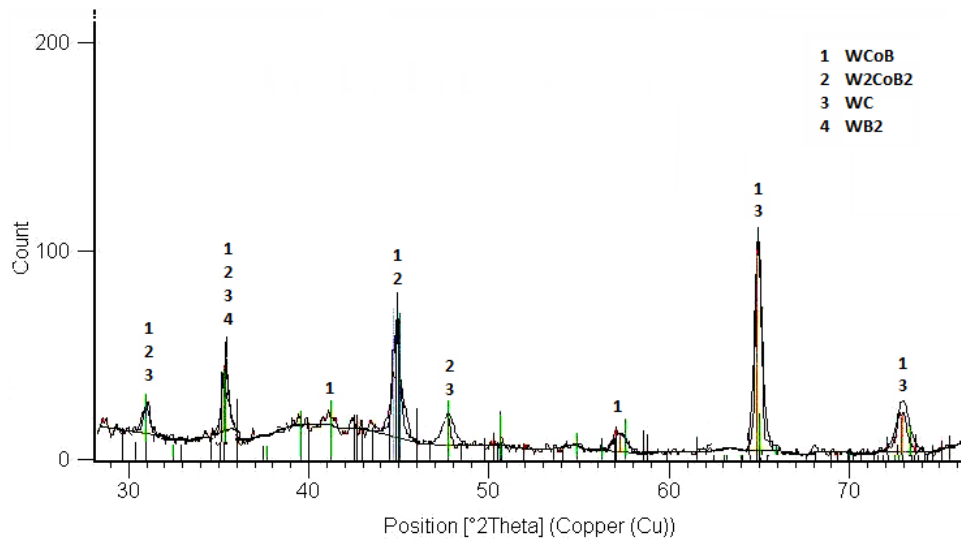


Şekil 4.14 1100 °C’de borlanmış numunelerin tabaka kalınlıkları

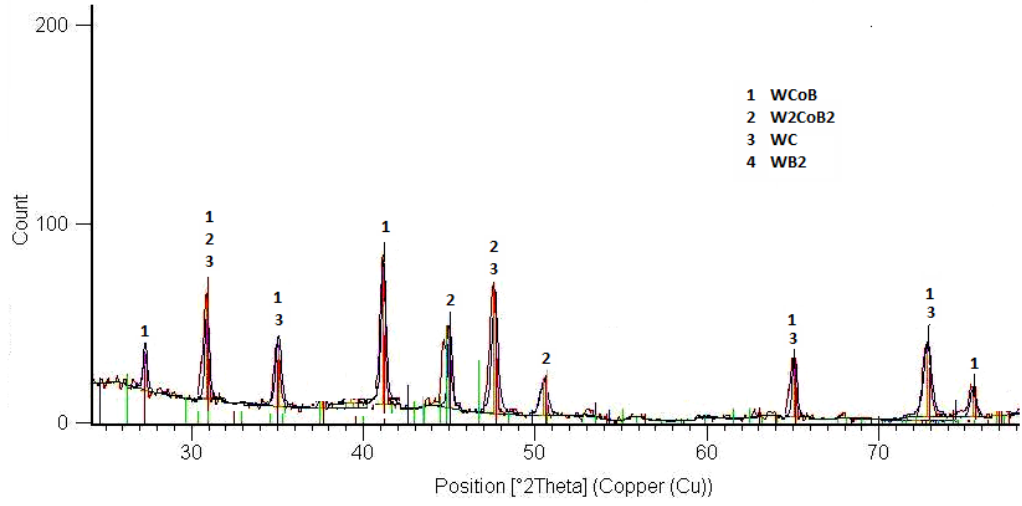
SEM incelemeleri tamamlanan numunelerin yüzeyinde oluşmuş olan borür tabakalarının fazlarını tayin etmek amacıyla XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları alttaki şekillerde gösterilmektedir.



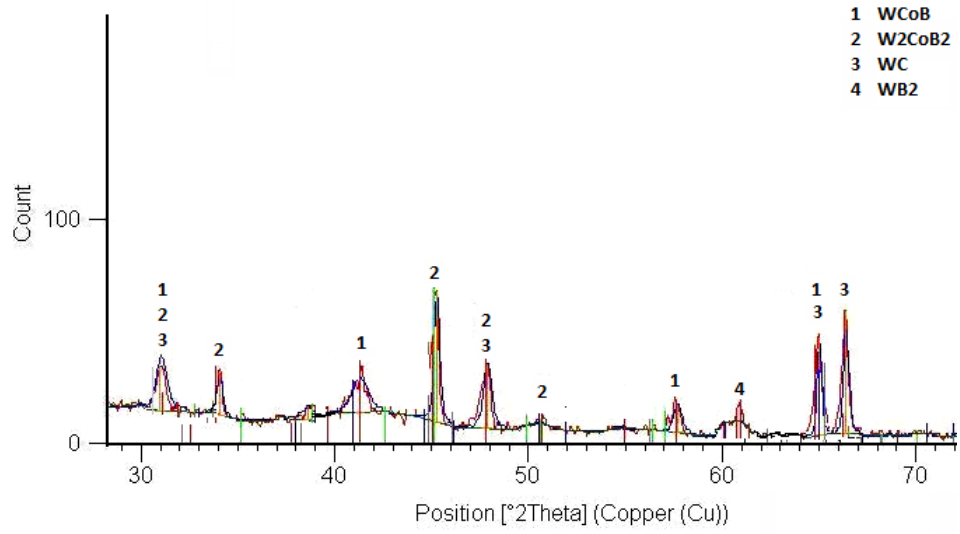
Şekil 4.15 900 °C’de 1saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi



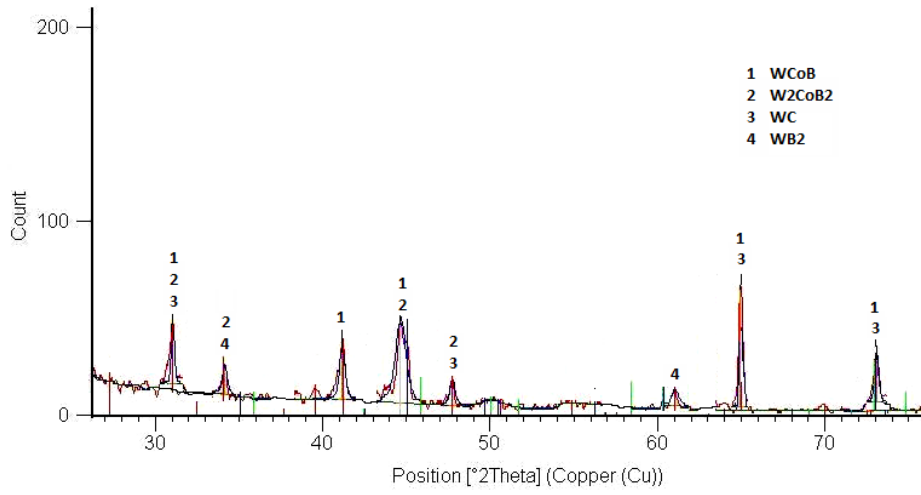
Şekil 4.16 900 °C’de 2saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi



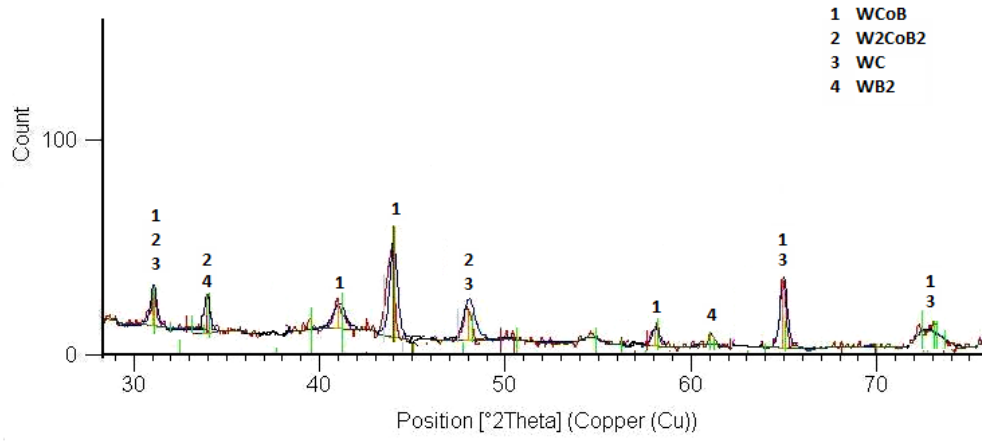
Şekil 4.17 900 °C’de 3saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi



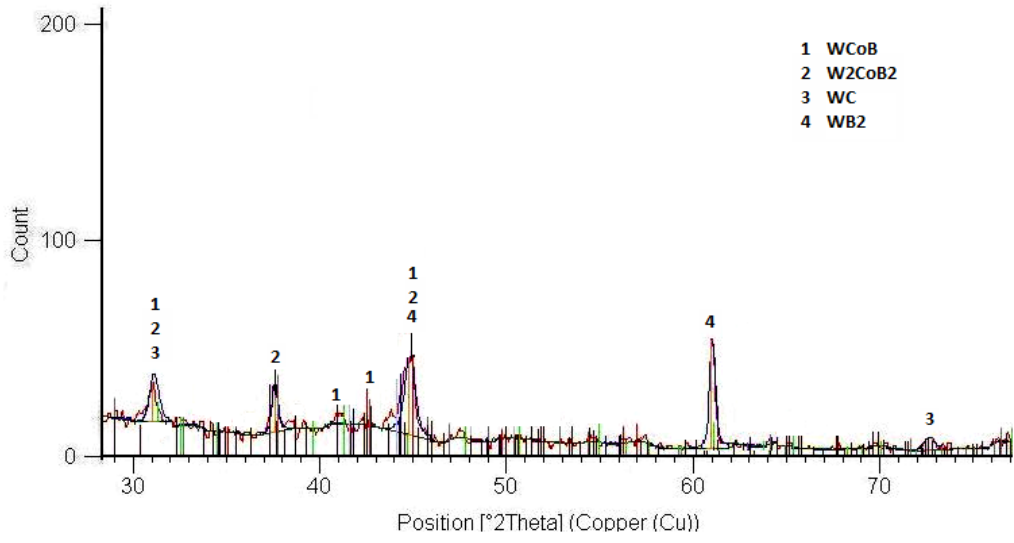
Şekil 4.18 1000 °C’de 1saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi



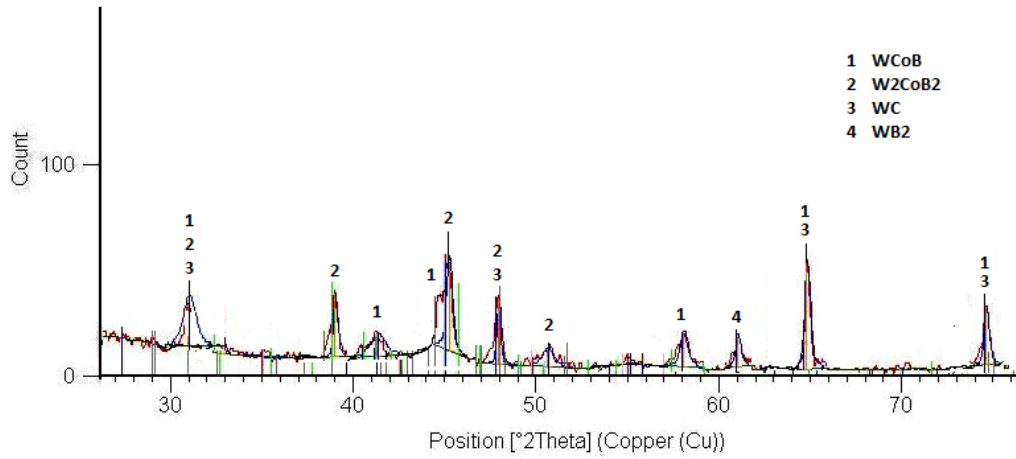
Şekil 4.19 1000 °C’de 2saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi



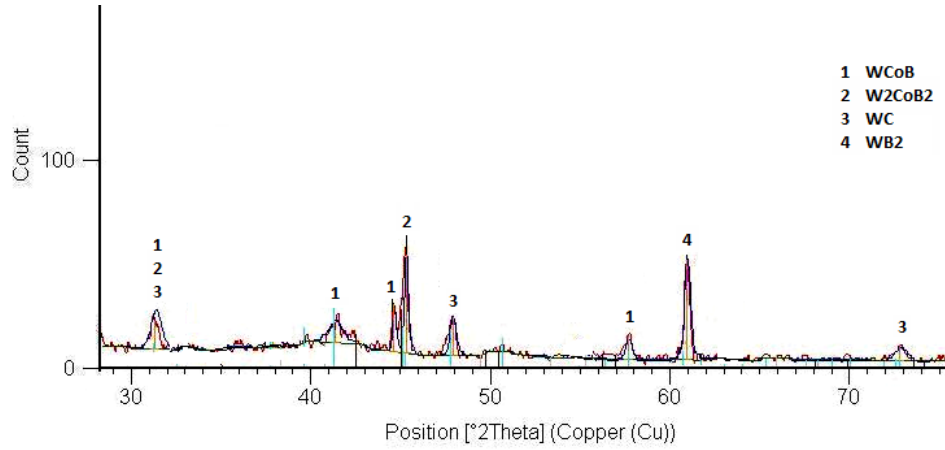
Şekil 4.20 1000 °C’de 3saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi



Şekil 4.21 1100 °C'de 1saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi



Şekil 4.22 1100 °C'de 2saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi



Şekil 4.23 1100 °C’de 3saat süre ile borlanmış numunenin XRD analizi

XRD analiz sonuçlarına bakıldığında, WC-Co’ın borlanması neticesinde elde edilen borür tabakasının WCoB, WCoB₂ ve WB₂ fazlarından oluştuğu belirlenmiştir.

4.2. Borlanmış Numunelerin Sertlik Ölçümleri

Borlanması tamamlanmış olan numunelerin borür tabakalarının sertlik ölçümlerinde, yüzeyden 5 µm derinlikten, 100 gr ağırlık kullanılarak 5’er ölçüm alınmıştır. Bu değerlerin ortalamalarından yola çıkılarak her bir numunenin sertliklerindeki değişimler grafiklere dönüştürülmüştür.

Çizelge 4.1 Numunelerin sertlik değışimleri

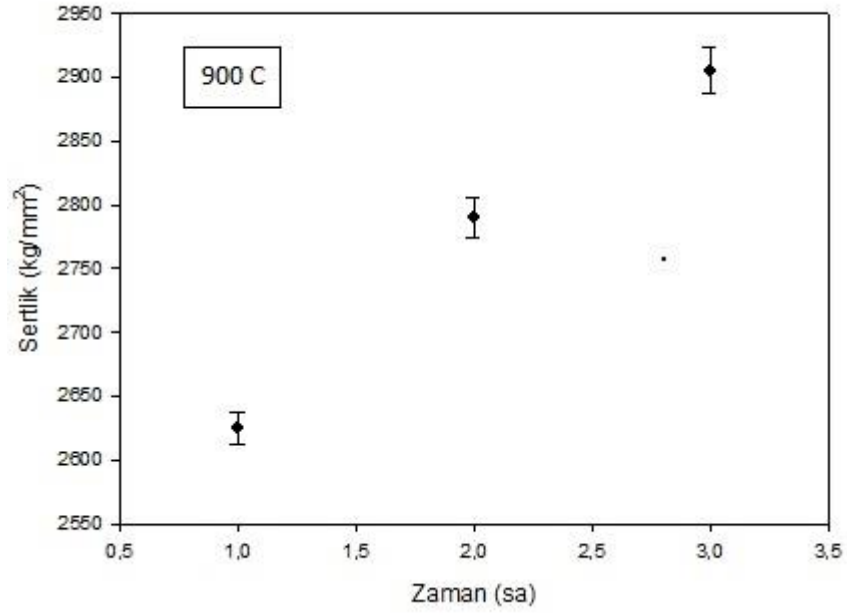
Numune no.	Borlama Süresi	Sertlik Hv0,1 (kg/mm ²)
Orjinal	-	(1582 ± 12)
900 °C	1 saat	(2625 ±12)
	2 saat	(2790 ±15)
	3 saat	(2905 ±19)
1000 °C	1 saat	(2497 ±11)
	2 saat	(2511 ±18)
	3 saat	(2799 ±14)
1100 °C	1 saat	(2320 ±13)
	2 saat	(2496 ±13)
	3 saat	(2803 ±11)

900 °C, 1000°C ve 1100°C'de 1, 2 ve 3 saat sürelerde gerçekleştirilen borlama işlemleri sonucu oluşan borür tabakalarının sertliklerindeki değışimi gösteren grafikler altta yer almaktadır.

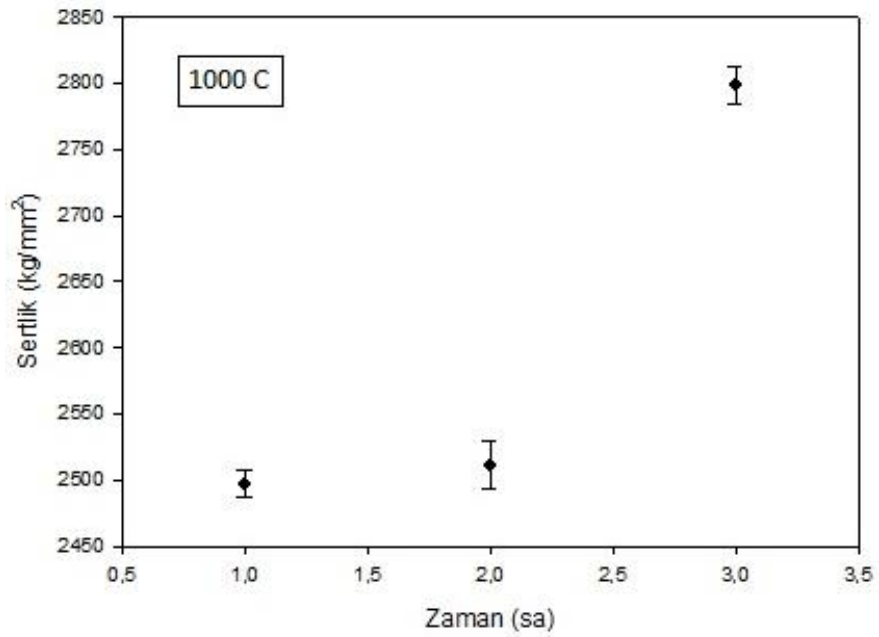
Grafiklere bakıldığında, borlama süresinin artışına paralel olarak, sertlik değerlerinde de belli bir yükselme söz konusu olmuştur. Bunun sebebi, yüzeyden içeriye doğru bor difüzyonunun artması olarak düşünülebilir. Süre ne kadar uzar ise borun malzeme içerisine yayılması da o kadar fazla olmaktadır. Bu süre difüzyon hızı, süresi ve sıcaklık ile bağlantılıdır.

Bir malzeme içinde atomların yayılım hızı, birim zamanda birim düzlem alanı boyunca geçen atom sayısı olarak tanımlanır.

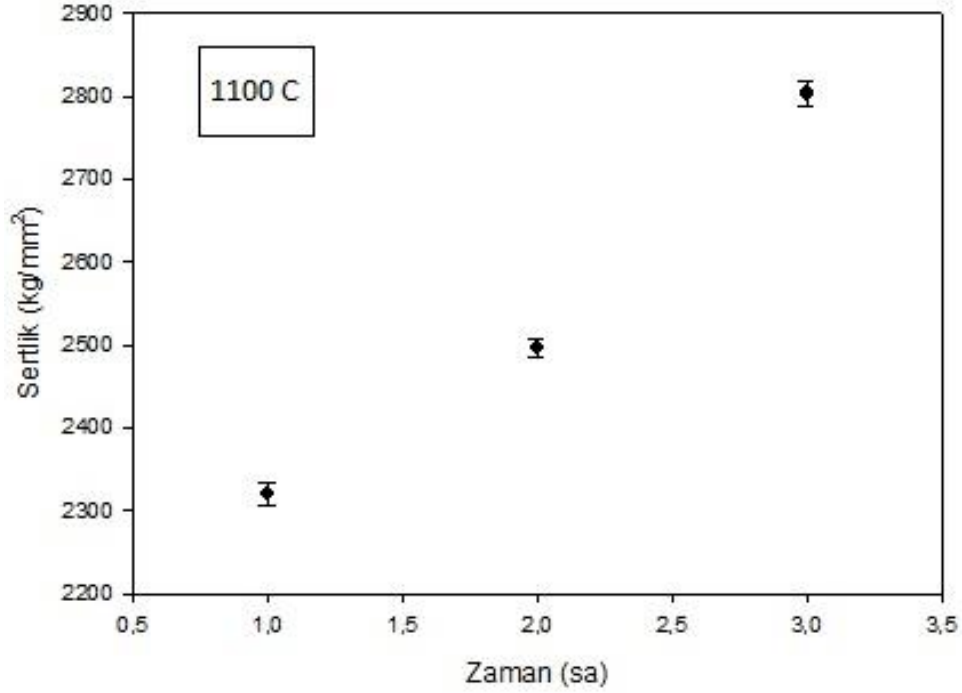
Buradan da anlaşılacağı üzere, malzeme içerisine yayılan bor miktarı, süreye bağlı artmaktadır. Burada sıcaklık sabit, süre arttığı için, oluşan tabakadaki bor atom sayısı da artmakta, dolayısıyla daha fazla bor atomu ihtiva eden tabakanın sertliği daha yüksek olmaktadır.



Şekil 4.24 900 °C’de borlanmış numunelerin sertlik değerleri



Şekil 4.25 1000 °C’de borlanmış numunelerin sertlik değerleri



Şekil 4.26 1100 °C’de borlanmış numunelerin sertlik değerleri

4.3. Borlanmış Numunelerin Kırılma Tokluğu Ölçümleri

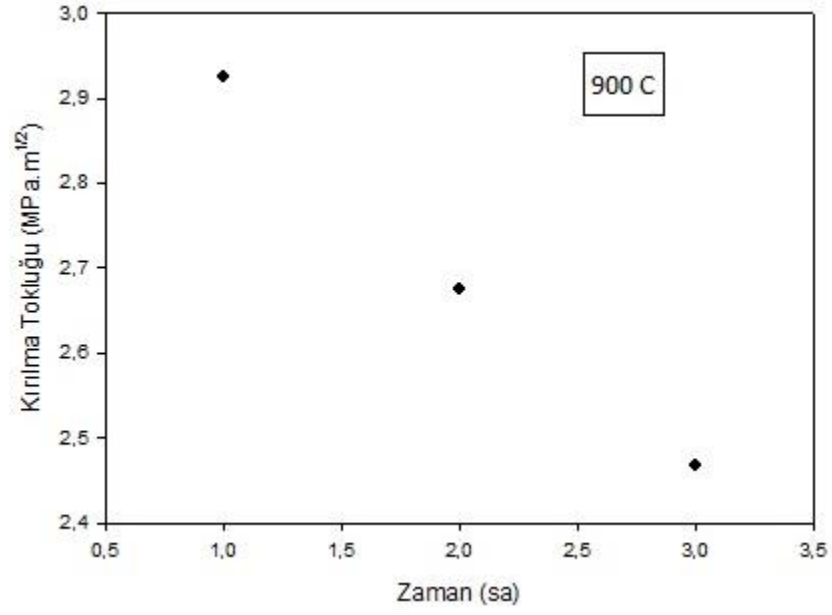
Borlama işlemi, malzemelerin yüzeylerinde oldukça sert bir tabaka oluşturduğu için, kırılmaya karşı dirençleri de azalmaktadır. Her ne kadar borlama işlemi sonucu aşınma dayanımı artsa da, darbelere karşı kırılma dayanımı düşmektedir. Kırılmaya karşı gösterilen dirençteki değişimi tespit etmek için kırılma tokluğu hesaplanmalıdır.

Kırılma tokluğu hesaplamalarında pek çok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi de, malzemelerin sertlik ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak kırılma tokluğunu hesaplamaktır. Borlanmış malzemelerin kırılma tokluğu tespitinde, kırılma tokluğunun anlatıldığı bölümde ayrıntısı yer alan «Palmqvist» isimli bilim adamı ile aynı ismi taşıyan yöntem kullanılmaktadır.

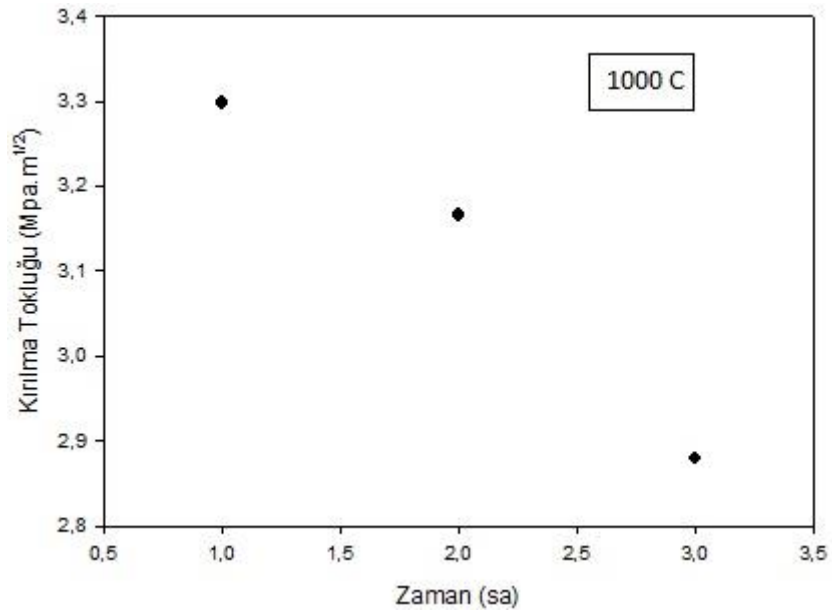
Bu tekniğin uygulanabilmesi için Vickers sertlik izinde çatlama oluşması gerektiğinden, malzemede çatlak oluşturabilecek bir yük değeri seçmek gerekmektedir. Bu nedenle 30 kg yük tatbik edilmiştir. Bu yük sayesinde çatlaklar oluşturulmuş, bu çatlakların boyutlarından faydalanılarak kırılma toklukları tespit edilmiştir.

Çizelge 4.2 Numunelerin kırılma toklukları

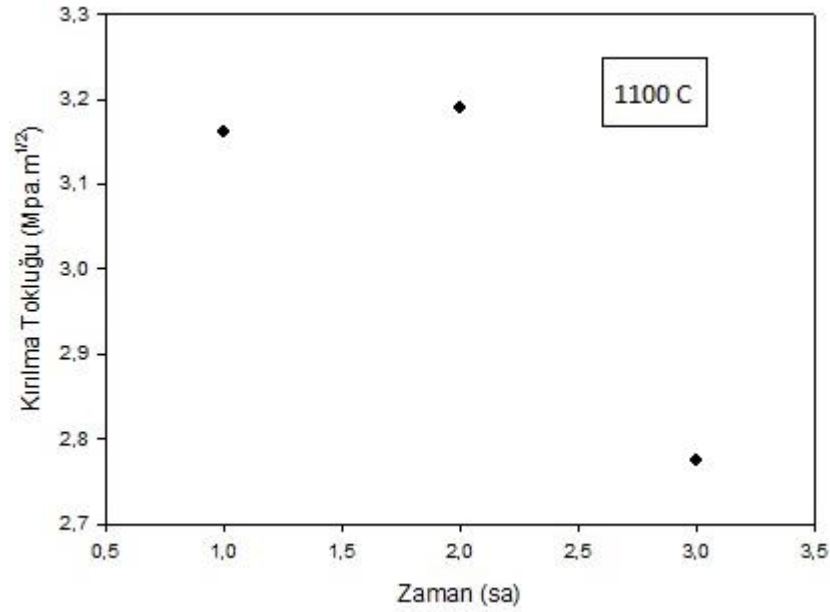
Numune no.	Borl ama Süre si	Çatlak uzunluğu (µm)	Kıc (MPa.m ^½)
orijinal		127 (Spiegler, 1990)	7 (Spiegler, 1990)
900 C	1 saat	375	2,925
	2 saat	390	2,675
	3 saat	406	2,468
1000 C	1 saat	352	3,298
	2 saat	361	3,166
	3 saat	382	2,879
1100 C	1 saat	371	3,162
	2 saat	360	3,189
	3 saat	381	2,775



Şekil 4.27 900 °C’de borlanmış numunelerin kırılma tokluk değerleri



Şekil 4.28 1000 °C’de borlanmış numunelerin kırılma tokluk değerleri



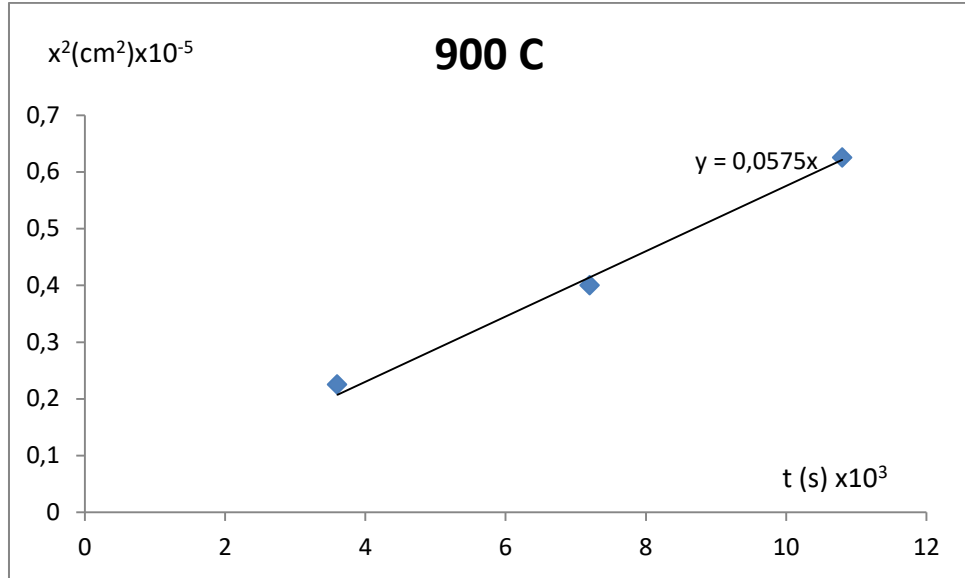
Şekil 4.29 1100 °C’de borlanmış numunelerin kırılma tokluk değerleri

Üstteki grafiklerden de anlaşılacağı üzere, sertlik yükseldikçe kırılma tokluğu da azalmaktadır.

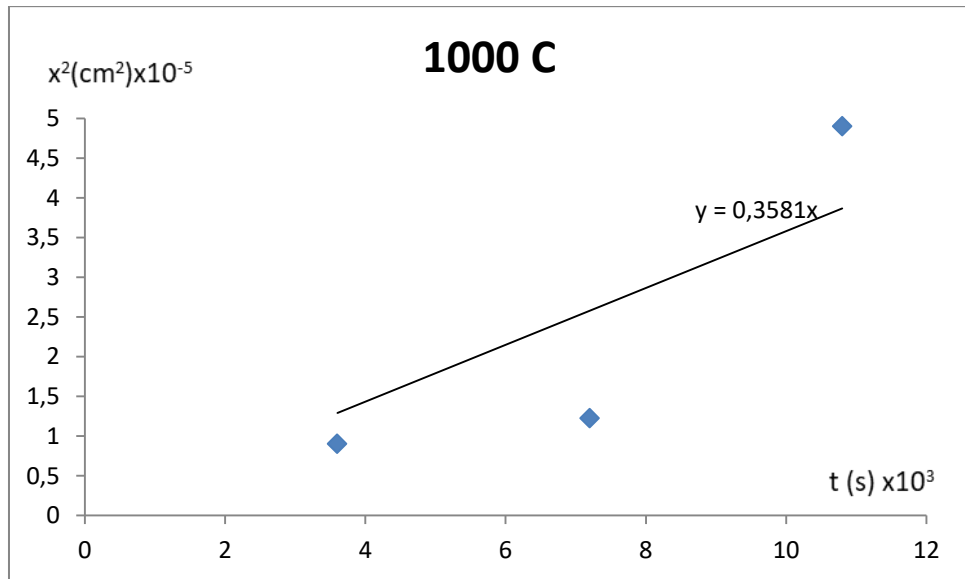
4.4. Borlanmış Numunelerin Kinetik İncelemeleri

Borlama kinetiği çalışmalarında önceki sayfalarda açıklanan Einstein’in kullanmış olduğu $x^2 = K.t$ difüzyon denklemi ışığında $K = K_0 \exp(-Q/RT)$ denkleminde faydalanılmıştır.

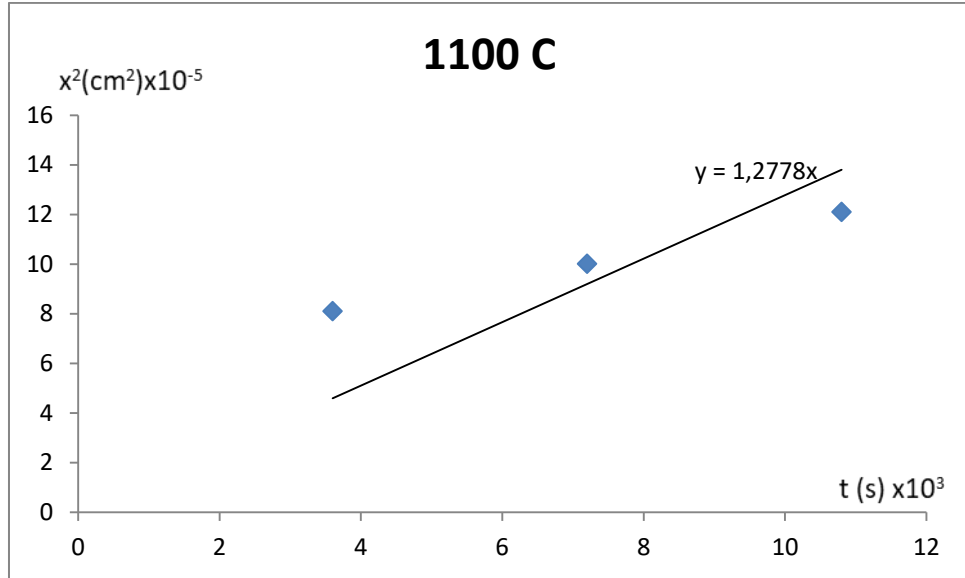
Buna göre öncelikle; 3 farklı sıcaklık ve zamanda borlanması sonucu oluşan borür tabakalarının kalınlıklarının karelerinin zamana bağlı olarak ayrı ayrı tespit edilen noktalarından geçen çizgilerin eğimlerinden her sıcaklık için tek tek tabaka büyüme oran sabitleri (K) bulunmuştur. X^2-t diyagramı olarak adlandırılan grafikler Şekil 4.30-4.32 arasında yer almaktadır.



Şekil 4.30 900 °C’de borlanmış numunelerin $x^2 - t$ diyagramı

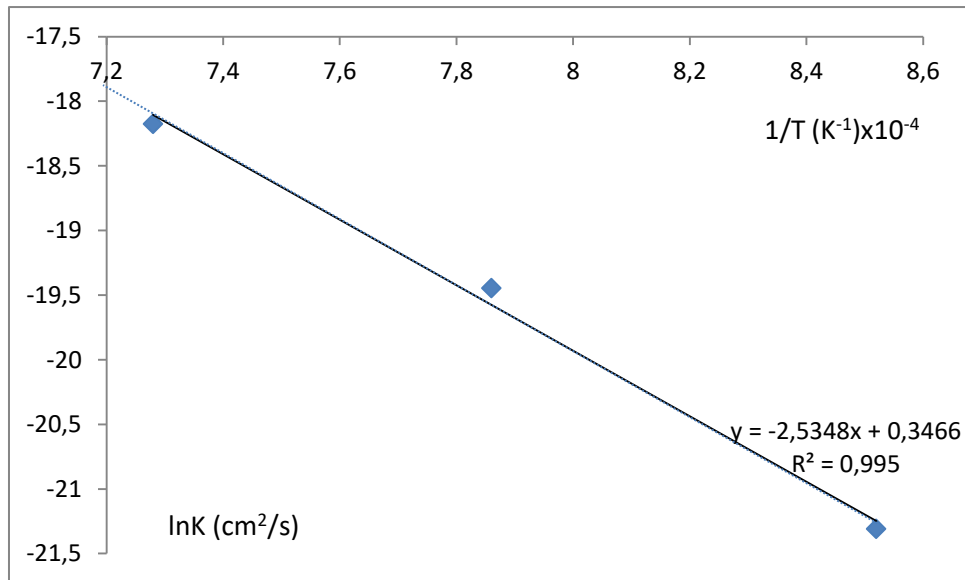


Şekil 4.31 1000 °C’de borlanmış numunelerin $x^2 - t$ diyagramı



Şekil 4.32 1100 °C'de borlanmış numunelerin $x^2 - t$ diyagramı

Tabaka büyüme oran sabitlerinin (K) tespitinden sonra bu sabitlerin ln'leri alınmış ve $1/^\circ\text{K}$ cinsinden sıcaklıkla oluşturduğu noktalar tespit edilip, bu noktalar arasından geçen çizginin eğiminden Q/R ve ordinatı kesim noktasından da “ K_0 ” sabiti bulunmuştur.



Şekil 4.33 Borlanmış WC-Co'ın $\ln K^{-1}/T$ diyagramı

$$x = \sqrt{K_0 \exp(-Q/RT) \cdot t}$$

$$T = 8,31435 \text{ J/mol.K} = 0,00831435 \text{ kJ/mol.K}$$

$$Q/RT = Q/R \cdot 1/T = 2,5348 \cdot 1/0,00831435 = 304,9 \text{ kJ/mol}$$

Çizelge 4.3 Borlanmış WC numunelerin borür tabaka kalınlıklarının hesaplanması

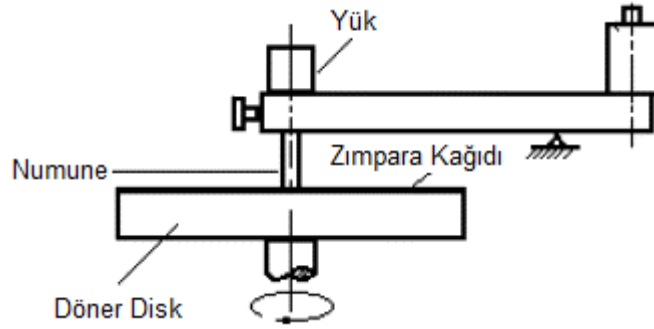
Malzeme Cinsi	Borür Tabaka Kalınlığı x (cm)
WC-Co	$\sqrt{1,86 \times 10^{-8} \exp(25348/T) \cdot t}$

Çizelge 4.4 Borlanmış WC numunelerinin kinetik hesaplarına ait değerler

Borlanan Malzeme	(K) Tabaka Büyüme Oran Sabiti (cm ² sn ⁻¹)			(Q)
	K _{1173°K} (*10 ⁻⁸)	K _{1273°K} (*10 ⁻⁸)	K _{1373°K} (*10 ⁻⁸)	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)
WC-Co	0,0575	0,3581	1,2778	305

4.5. Borlanmış Numunelerin Aşınma Durumlarının İncelenmesi

3 farklı sıcaklık (900 °C, 1000 °C ve 1100 °C) ve 3 farklı sürede (1-2-3 saat) borlanmış olan numunelerin aşınma durumlarının belirlenmesi amacıyla pin-on disk yöntemiyle aşınma testleri gerçekleştirilmiştir.



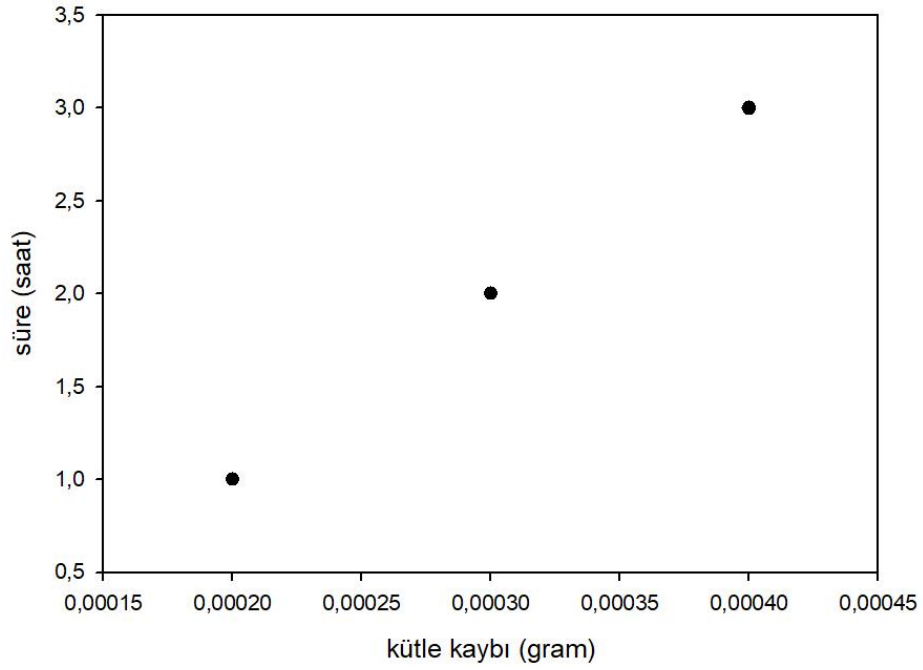
Şekil 4.34 Şematik Pin-On disk cihazı

Testlere başlamadan önce tüm numunelerin kütleleri 1/10000 hassasiyetli terazi ile havasız ortamda ölçülmüştür. Daha sonra 40 N yük altında, 0,52 m/sn hız, 50 rpm (dakikadaki devir sayısı) özelliklerle, 2000 numaralı silisyum karbür zımpara kağıdı üzerinde 500 mt boyunca aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerin tamamlanması sonrası, numunelerdeki kütle kayıpları aynı hassasiyette ölçülerek belirlenmiş ve sonuçları Çizelge 4.5 ile 4.7 arasında verilmiştir ve grafikleri de Şekil 4.35 ile Şekil 4.37 arasında verilmiştir.

Orijinal numunede kayıp 0,029 gr (16,992 gr'dan 16,963 gr'a) en fazla kayıp olan numunede bile 3.5 kat az kayıp, en az kayıp olanla arasındaki fark 145 kat.

Çizelge 4.5 900 °C numunelerinin kütle kaybı

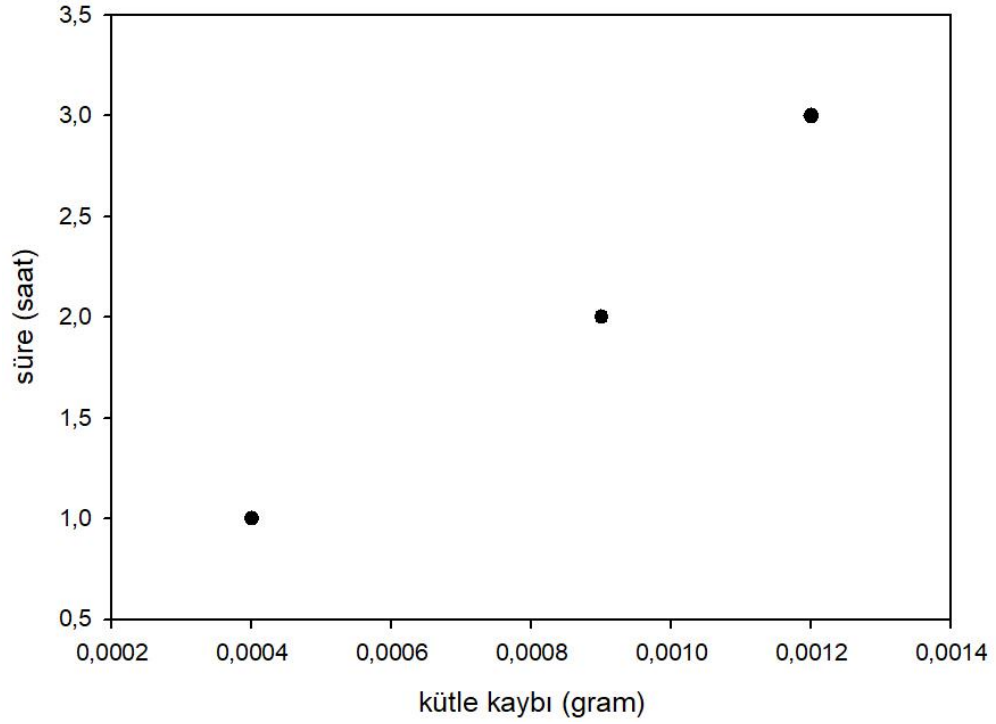
900 C			
1 SAAT	BAŞLANGIÇ KÜTLESİ (gr)	BİTİŞ KÜTLESİ (gr)	FARK
	17,8952	17,895	0,0002
2 SAAT	BAŞLANGIÇ	BİTİŞ	FARK
	17,8118	17,8115	0,0003
3 SAAT	BAŞLANGIÇ	BİTİŞ	FARK
	17,8453	17,8449	0,0004



Şekil 4.35 900 °C numunelerinin kütle kaybı

Çizelge 4.6 1000 °C numunelerinin kütle kaybı

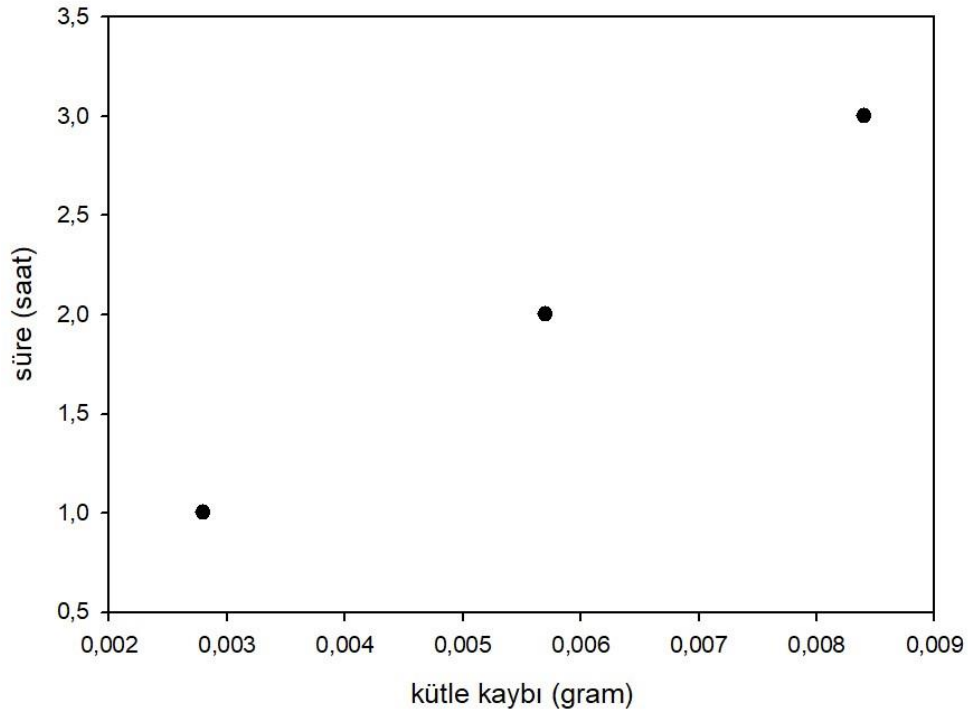
1000 C			
1			
SAAT	BAŞLANGIÇ	BİTİŞ	FARK
	17,9309	17,9305	0,0004
2			
SAAT	BAŞLANGIÇ	BİTİŞ	FARK
	17,885	17,8841	0,0009
3			
SAAT	BAŞLANGIÇ	BİTİŞ	FARK
	17,8042	17,803	0,0012



Şekil 4.36 1000 °C numunelerinin kütle kaybı

Çizelge 4.7 1100 °C numunelerinin kütle kaybı

1100 C			
1			
SAAT	BAŞLANGIÇ	BİTİŞ	FARK
	16,5762	16,5734	0,0028
2			
SAAT	BAŞLANGIÇ	BİTİŞ	FARK
	16,226	16,2203	0,0057
3			
SAAT	BAŞLANGIÇ	BİTİŞ	FARK
	16,0486	16,0402	0,0084



Şekil 4.37 1100 °C numunelerinin kütle kaybı

Yukarıda da gösterildiği üzere, en yüksek kütle kaybı 1100 C’de borlanmış numunelerde gerçekleşmişken, en az kütle kaybı ise 900 C’de borlanmış numunelerde gerçekleşmiştir. Aynı sıcaklıklarda borlanmış numuneler kendi arasında kıyaslandığında ise, en fazla kütle kaybının 3 saat borlanmış numunelerde meydana geldiği belirlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneysel kısım öncesi gerekli literatür taraması yapılarak, borlama deneyleri için 900-1000 ve 1100°C sıcaklıkta 1-2 ve 3 saat sürelerin kullanılmasına karar verilmiştir. Atmosfer kontrollü fırında kutu borlama yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde, borlama tozu olarak EKabor 2 kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan WC-Co aşındırıcı uçlar, ülkemizde üretilmediğinden, yurt dışından temin edilmiştir.

Numunelerin özelliklerinin aynı olduğunu anlamak için EDX analizleri gerçekleştirilmiş ve hepsinde WC oranının %90, Co oranının ise %10 olduğu belirlendikten sonra, mikroyapı incelemeleri için numuneler metalografik olarak hazırlanmıştır. Metalografik incelemeler için, numunelerin yüzeyleri 120 ila 1200 kumluk zımpara kağıtları kullanılarak çiziksiz hale getirilmiş, ardından alümina ile parlatılmış ve son olarak da Murakami ayırıcı (10 gr $K_3Fe(CN)_6$ + 10 gr KOH + 100 ml su) ile dağlanmıştır(<http://www.metallographic.com/Etchants/Etchants.htm>. 2018).

Borlama işlemleri sonrası borür tabakalarının metalografik incelemeleri için öncelikle numunelerin hepsine soğuk kalıplama (sıvı reçine ve katılaştırıcı) işlemi uygulanmıştır. Bu sayede numuneleri kesitten inceleme olanağı bulunmuştur. Kalıplanmış numunelere ait resim şekil 4.38'de yer almaktadır.



Şekil 4.38 Kalıplanmış numuneler

Kalıplama işlemi sonrası, numunelerin zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri gerçekleştirilerek, mikroskop altında inceleme işlemlerine geçilmiştir. Numunelerin kesitlerine yapılan incelemeler neticesinde, borür tabakalarının görüntüleri elde edilmiş ve bu tabakaların kalınlıkları ölçülmüştür. Buna göre en kalın tabakaların 1100°C’de borlanmış numunelerde olduğu, ayrıca zamanın artışına bağlı olarak kalınlığın da arttığı belirlenmiştir. Genel olarak tüm numunelerde homojen ve çeliklerde oluşan testere dişli borür tabakasının tersine kolonsal yapılı tabaka olduğu görülmüştür. WC-Co malzemesi toz metalürjik bir numune olduğu için, taneler arasında gözenekler bulunmaktadır. Bu gözenekli yapı, borür tabakalarında da göze çarpmakla birlikte, özellikle 1100°C’de borlanmış numunelerde tabakalardaki bu gözenek yapısının kısmen kaybolduğu tespit edilmiştir.

Optik mikroskop incelemeleri tamamlanan numunelerin yüzeyinde oluşmuş borür tabakalarının sertlik ölçümleri için Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Ağırlık olarak 100 gr kullanılmıştır. Her numune için yaklaşık 5’er ölçüm alınarak, ortalama sertlikler belirlenmiştir. Borlanmamış numuneye kıyasla yaklaşık 1,5 ila 2 kata yakın sertlik artışı belirlenen numunelerde, zamanın artışına paralel olarak sertlik değerlerinin de arttığı belirlenmiştir. Sıcaklık artışının ise, sertliği belli oranda düşürdüğü belirlenmiştir.

Borlama işlemi, malzemelerin yüzeylerinde oldukça sert bir tabaka oluşturduğu için, kırılmaya karşı dirençleri de azalmaktadır. Her ne kadar borlama işlemi sonucu aşınma dayanımı artsa da, darbelere karşı kırılma dayanımı düşmektedir. Kırılmaya karşı gösterilen dirençteki değişimi tespit etmek için kırılma tokluğu hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu ölçümlerinde yine Vickers sertlik ölçme cihazı kullanılmış ve çatlama oluşması için 30 kg yük uygulanmıştır. Palmqvist formülü ile yapılan hesaplamalar sonucunda, sertlik arttıkça kırılma tokluğunun düştüğü görülmüştür. Bu da beklenen bir sonuçtur.

Daha önce optik mikroskopta gerçekleştirilen incelemelerin yanı sıra, borür tabakalarının daha belirgin görüntülenebilmesi ve tabaka kalınlıklarının ölçülebilmesi için Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Geri saçılan elektronlar kullanılarak elde edilen görüntülerde, borür tabakası ile esas malzeme arasındaki ayırım son derece belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Görüntüler üzerinden tabaka kalınlıkları daha ayrıntılı olarak ölçülebilmektedir. Bunun yanı sıra, borür tabakasını

oluşturan elementlerin ve esas malzemeyi oluşturan elementlerin dağılımını görmek için EDX ünitesi yardımıyla renkli haritalama yapılmış ve tabaka ile ana malzemenin ayrımı daha belirgin şekilde görülmüştür.

Mikroskopik incelemelerin tamamlanması sonrası, borlanmış numunelerdeki fazların belirlenebilmesi için XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde, borür tabakalarının WCoB, WCoB₂ ve WB₂ fazlarından oluştuğu belirlenmiştir. Bu da literatüre göre doğru bir sonuç olduğunun göstergesidir.

Difüzyon işlemlerinde, bilinen veriler ışığında kinetik incelemelerin yapılması gerekmektedir. Bu sebeple, borlanmış numunelerin kinetik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalar neticesinde borür tabaka kalınlığının borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak belirlenebilmesi amacıyla pratik bir denklem oluşturulmuş, sıcaklığa bağlı olarak borür tabakasının büyüme oranları belirlenmiş ve son olarak da aktivasyon enerjisi bulunmuştur. Hesaplamalar göstermiştir ki, borlama sıcaklığının artması ile borür tabakasının büyüme hızı da artmakta, aynı sürede fakat farklı sıcaklıkta borlanan malzemenin yüzeyinde oluşan borür tabakasının, yüksek sıcaklıkta borlanmış olan numunede daha kalın olduğu belirlenmiştir.

Borlama işleminin temel amacının, malzemelere aşınma direnci kazandırmak olduğu pek çok çalışmada belirtilmiş olmakla beraber, WC-Co gibi aşınma direnci yüksek bir malzeme yüzeyine uygulandığında, daha da aşınma dirençli olup olmadığını belirleyebilmek için aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Aynı koşullarda gerçekleştirilen aşınma testleri neticesinde, malzemelerdeki kütle kayıplarından yola çıkarak, borlanmış WC-Co'ın borlanmamış olana nazaran oldukça yüksek aşınma direnci gösterdiği belirlenmiştir. Bu da WC-Co gibi pahalı ve işlevsel bir malzemenin borlanarak ömrünün uzatılabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akdoğu, K.: “Akışkan Yataklı Fırınlarda Sertleştirme, Menevişleme ve Östemperleme İşlemleri”, Yıl içi Projesi, Y.T.Ü, (2007).
- Anstis G. R., Chantikul P., Lawn B. R., and Marshall D. B. (1981). A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: I, Direct Crack Measurements, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 64, No. 9, (September 1981) pp. 533–538
- Anthymidis, K.G.; Maragoudakis, N.; Stergioudis, G.; Haidar, O.; Tsipas, D.N.: “A Comparative Studt of Boride Coatings Optained bye Pack Cementation Method and Fluidized Bed Technology”, Materials Letters, (2003) s.2399-2403.
- Arraste, Marek & Juhani, Kristjan & Pirso, Jüri & Viljus, Mart. (2015). Reactive Sintering of Bimodal WC-Co Hardmetals. Materials Science Medziagotyra. 21. 10.5755/j01.ms.21.3.7511.
- Atik E.; “Çeliklerin Borlanarak Aşınma Dayanımlarının Arttırılması”, Mühendis ve Makine, 445: 17-20, 1997.
- Barkat A., A.D. Hammou and O. Allaoui “Effect of Boriding on the Fatigue Resistancebof C20 Carbon Steel” ACTA PHYSICA POLONICA A, vol 132, s.813-815, 2017.
- Biddulph, R. H.; “Boronizing for Erosion Resistance”, Thin Solid Films, 45: 341-347, 1977.
- Bindal, C.: “Az Alaşımlı Çelikler ve Ticari Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzeye Kaplanan Borür Tipi Seramik Kompozitlerin Bazı Özelliklerinin Tespiti”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Haziran (1991).
- Bhushan,B.;Gupta,B.K.:“Handbook of Tribology”, McGraw-Hill, Inc.(1991).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Blocher J. M., Guy E. Vuillard, Georg Wahl: “Proceedings of the Eighth International Conference on Chemical Vapor Deposition” Electrochemical Society, sayfa: 509, 1981.

Brandes, E.A.; Brook, G.B.; (Ed.) “Smithells Metals Reference Book”, 7th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, (1992).

Campos I., J. Oseguera, U. Figueroa, J. A. Garcí'a, O. Bautista and G. Kelemenis: Mater. Sci. Eng. A, 2003, A352, 261–265.

Chunmin Li, Baoluo Shen, Guijiang Li, Chao Yang: “Effect of Boronizing Temperature and Time on Microstructure and Abrasion Wear Resistance of Cr₁₂Mn₂V₂ High Chromium Cast Iron” Surface & Coatings Technology, vol. 202,p.5882-5885, (2008).

Cömert, Z.Y.: “Akışkan Yataklı Fırında Nitrasyon İşlemleri”, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, (2002).

Çelebi,G.F.: “31CrMoV₉ ve 34CrAlNi₇ Çeliklerinin Borlama Kinetiklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Haziran (2005).

Davis,J.R.: “Surface Hardening Of Steels: Understanding The Basics” ASM International, (2002).

Dawihl, V.W. and Altmeyer, G.: “Determination of Deformation Resistance of Ultra-heat Resistance Material, Particularly of Hard Metals, by Measurement of Crack Formation”, Z Metal 55:231-237, (1964).

Delikanlı, K.; Çalık, A.; Uzun, H.A.: “Sade Karbonlu Bir Çeliğin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi”, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5.1, (2003).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Efe,G.Ç.; İpek,M.; Özbek,İ.; Bindal.C: “Kinetics of Borided 31CrMoV9 and 34CrAlNi7 Steels” *Materials Characterization* 59, 23 – 31 (2008).

Enver Atık, Umut Yunker, Cevdet Meric.: “The Effects of Conventional Heat Treatment and Boronizing on Abrasive Wear and Corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 Steels”. *Tribology International* V.36, s.155–161(2003).

Exner H.E.: "The influence of sample preparation on Palmqvist method for toughness testing of cemented carbides", *Transactions of the Metallurgical Society of AIME* 245, 677-683 (1969).

Ferreira J.A.M.; M.A. Pina Amaral; F.V.Antunes; J.D.M.Costa: “A study on the mechanical behaviour of WC/Co hardmetals” *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Volume 27, Issue 1, January 2009, Pages 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.01.013>.

Filepa, E.; Farkas, S.: “Kinetics of Plasma-Assisted Boriding” *Surface & Coatings Technology* 199 (2005) 1 – 6.

Göy, Z., “Borlama”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil. Enst., İstanbul, 1984.

Gözde Fatma Çelebi “31CrMoV₉ ve 34CrAlNi₇ Çeliklerinin Borlama Kinetiklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Haziran (2005).

<http://www.bortec.de/boronizing.htm> (2008).

<https://datasheets.globalspec.com/ds/3961/CARBOLITEGERO/A2E2D2CA-9B2A-45A2-A520-CF1E1C1218FF> erişim 18.10.2018.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

http://www.diversifiedvacuum.com/products/custom/vacuum_oven/door_open/ erişim 05.11.2018.

<http://www.metallographic.com/Etchants/Etchants.htm> erişim 10.01.2018.

<https://tr.wikipedia.org/wiki/volfram> erişim 29.11.2017.

<http://www.periodictable.com/Items/074.5/index.html> erişim 05.01.2018.

<http://www.tejingtungsten.com/products/cast-tungsten-carbide-powder> erişim 05.01.2018.

<http://www.muhendisalemi.com/toz-metalurjisi-ile-malzeme-uretim-asamalari/> erişim 05.01.2018.

<https://www.makaleler.com/kobalt-nedir-ozellikleri-nelerdir-nerelerde-kullanilir.erişim> 05.01.2018.

<https://nanopartikel.info/en/nanoinfo/materials/tungsten-carbide-cobalt/material-information> erişim 09.01.2018.

https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/materials/cutting_tool_materials/cermet/pages/default.aspx 09.01.2018.

<https://www.cgtrader.com> erişim 12.09.2018.

<https://slideplayer.com/slide/4105883/> erişim 25.09.2018.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

http://iramis.cea.fr/spec/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_visu.php?id_ast=308 erişim
25.09.2018.

<https://malzemebilimi.net/difuzyon-atomsal-yayinim.html> erişim 25.09.2018.

<https://www.revolvy.com/page/Grain-boundary> erişim 25.09.2018.

http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=diffusion_in_alloys erişim 25.09.2018.

<https://malzemebilimi.net/difuzyon-atomsal-yayinim.html> erişim 25.09.2018.

http://rahmiunal.net/dersler/malzeme/MB_08_difuzyon.pdf erişim 25.09.2018.

<http://webders.net/670/aktivasyon-enerjisi-nedir.html> erişim 25.09.2018.

<http://webders.net/670/aktivasyon-enerjisi-nedir.html> erişim 25.09.2018.

http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/70503/34167/4._ders_notu.pdf erişim
25.09.2018.

<http://www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-elementi> – erişim 02.10.2017.

<http://www.nnt.com.tr/bor/bor-kullanım-alanlari.php> - erişim 02.10.2017.

http://www.dosem24hr.com/images/column_1329896384/Jeol%20Scanning%20electron%20microscope%20JSM%205400.pdf- erişim 30.01.2019.

<https://studyres.com/doc/19428546/information-about-the-panalytical-x-pert-pro-multipurpose-> erişim 30.01.2019.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

http://www.academia.edu/13747226/TOKLUK_VE_KIRILMA_Do%C3%A7.Dr.Salim_%C5%9EAH%C4%A0N_TOKLUK erişim 11.01.2018.

Karakan M.; A. Alasaran.; A. Çelik.: “Plazma Borlama”, Mühendis ve Makine, Cilt 43, Sayı 512, s. 51-54. (2002).

Karaman Y.: “Endüstriyel Borlama ve Tekstil Endüstrisinde Bir Uygulama” Süleyman Demirel Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, Isparta (2003).

Kenneth J.A.Brookes: “Fine-structured hardmetals and grain-growth inhibitors” Metal Powder Report. Cilt 71, sayı 2, (2016).

Kulka M., N.Makuch, A.Pertek, A.Piasecki: “An alternative method of gas boriding applied to the formation of borocarbured layer” Materials Characterization, Volume 72, October 2012, Pages 59-67, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.07.009>.

Küper,A.; X. Qiao; Stock, H.R.;Mayr, P.: “A Novel Approach to Gas Boronizing” Surface and Coatings Technology 130(2000).87-94.

Li Y.R., S.W. Jiang, Y. Zhang, X.W. Deng and X.H. Wei: “Surface Diffusion During Layer Growth of SrTiO₃ Films With Pulsed Laser Molecular Beam Epitaxy” Journal of Crystal Growth Volume 278, Issues 1-4, Pages 629-632, 13th International Conference on Molecular Beam Epitaxy,1 May (2005).

Maragoudakis N.E.,G.Stergioudis.,H.Omar.,E.Pavlidou.,D.N.Tsipas.:“Boro-nitriding of Steel US 37-1”,Materials Letters 57, (2002), 949-953.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Materials Science International Team, MSIT®, Peter Rogl, Part of the Landolt-Börnstein - Group IV Physical Chemistry book series (volume 11E1), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009.

Melendez E., I. Campos, E. Rocha, M.A. Baron.: “Structural and Strength Characterization of Steels Subjected to Boriding Thermochemical Process” Materials Science and Engineering A234-236 -(1997).

Mikell P. Groover: “Fundamentals of Modern Manufacturing - Materials, Processes and Systems” John Wiley & Sons, Inc. 4th edition, ISBN 978-0470-467002, 2010.

Nazım, B.: “Bor Yayınımla Çeliklerde Yüzey Sertleşmesi” Doktora Tezi, İTÜ (1984).

Nil ÜNAL: “ The Effect of Boron Carbide Addition on the Structural and Mechanical Properties of Tungsten Matrix Composites” Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, (2006).

Ozdemir, O.; Omar, M.A.; Usta, M.; Zeytin, S.; Bindal, C.; Ucisik, A.H.: “An Investigation on Boriding Kinetics of AISI 316 Stainless Steel” Vacuum 83,175–179 (2009).

Özbek, İ.: “Borlama Yöntemiyle (AISI M50, AISI M2) Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Aralık (1999).

Özsoy, A.: “Çeliğin Borlanması Borür Tabakası, Geçiş Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi”, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (1991).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Palmqvist S., "Method att bestamma segheten hos sproda material, sarskilt hardmetaller", Jernkontorets Ann., 141, s.300-307, (1957).

Reynoldson, Ray W.: "Heat Treatment in Fluidized Bed Furnaces" The Materials Information Society (1993).

Richard Beatty "The Elements - Boron" Marshall Cavendish Benchmark – New York – 99 White Plains Road – Tarrytown. 2006.

Roland Spiegler; Siegfried Schmadder; Lorenz S. Sigl: "Fracture Toughness Evaluation of WC-Co Alloys by Indentation Testing" Journal Of Hard Materials, Vol. 1, No. 3, 1990.

R.Ü. Malzeme Bilgisi Ders Notları: "Atomsal Yayınım" (2008).

Sabri Altınoluk: "Tünel Açma Makinalarında Kazıcı Uçların Aşınmalarına Etki Eden Faktörler ve Etkileri" Etibank Bursa Maden tgl. Mües. Bursa.

Salih Uğur BAYÇA, Salim ŞAHİN: "Borlama" Mühendis ve Makine, sayı:533 (2004).

Sen,S.; Sen,U.; Bindal,C.: "The Growth Kinetics of Borides Formed on Boronized AISI 4140 Steel" Vacuum 77,195–202 (2005).

Sen,U: "Kinetics of Titanium Nitride Coatings Deposited by ThermoReactive Deposition Technique" Vacuum 75,339–345 (2004).

Shetty D. K., I. G. Wright, P. N. Mincer, A. H. Clauer: "Indentation fracture of WC-Co cermets" JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 20 s.1873-1882, (1985).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Simonenko A. N., V. A. Shestakov, V. N. Poboinya: “Liquid boriding in induction salt baths” Metal Science and Heat Treatment, No. 5, pp. 51-52, May, 1982.

Sinha AK. Boriding (Boronizing), “ASM Handbook, Vol 4: Heat Treating”. Materials Park, OH: ASM International; (1991).

Şen, U.: “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Borlanması”, Doktora Tezi, İTÜ (1998).

Şimşek M.: “İçten Yanmalı Motorlarda Borlama ile Mukavemet Özelliklerinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (2005).

Thehning,K.E: “Steel and its Heat Treatment: Bofors Handbook”, Butterworths, (1975).

The Science and Engineering of Materials, 4th ed Donald R. Askeland – Pradeep P. Phuille’.

Topuz,P.: “Akışkan Yataklı Fırında Farklı Çeliklerin Borlanması ve Borlama Parametrelerinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, MÜ. (2009).

TS EN ISO 4885 “Demir esaslı malzemeler-Isıl işlemler – Sözlük” 24.04.2017.

TS EN ISO 6507-1.

Umut Yapar: “ Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama ile Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi” İTÜ, Fen Bil. Enst., Y.Lisans Tezi 2003.

US Patent 5064691 – “Gas Phase Borosiliconization of Ferrous Surfaces”. Issued on November 12, (1991).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Utku GÜNER “Toksikoloji” Trakya Üniversitesi Fen Fakültesi Yayını, Versiyon 2.0.0, (2014).

Uzun, H.A.: “Borlama ile Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, T.C. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, (2002).

Vijay G. Ukadgaonker: “THEORY OF ELASTICITY AND FRACTURE MECHANICS” PHI Learning; 1 edition (October 1, 2015)]-[George C. Sih: “Methods of Analysis and Solutions of Crack Problems” Springer Science & Business Media, s.10-12 (2013).

William Francis 1858- Magie, Tr [And], Sadi 1796-1832 Carnot, R. (Rudolf) 1822-1888 Clausius, “The Second Law of Thermodynamics: Memoirs” WENTWORTH Press, 2016.

www.azon.com (International Tungsten Association and Ceramic Research) erişim 29.11.2017.

www.bilgiustam.com/tünel-yapimi-ve-gelişimi/ erişim 28.11.2017.

Wu Musheng, Xu Bo, Ouyang Chuying: “Physics of electron and lithium-ion transport in electrode materials for Li-ion batteries” Chinese Physics B, 2016, 25(1).

Yang H.P., X.C.Wu, Y.A.Min, T.R.Wu, J.Z.Gui: “ Plasma boriding of high strength alloy steel with nanostructured surface layer at low temperature assisted by air blast shot peening” Surface and Coatings Technology, Volume 228, 15 August 2013, Pages 229-233.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Yapar, U.: “Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama ile Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Mayıs (2003).

Yoon, J.H.; Jee, Y.K.; Lee, S.Y.: “Plasma Paste Boronizing Treatment Of The Stainless Steel AISI 304” Surface and Coatings Technology 112 (1999)71–75.

ÖZGEÇMİŞ



1. Adı Soyadı : TUNA AYDOĞMUŞ
2. Doğum Tarihi : 03.07.1987
3. Unvanı : ÖĞRETİM GÖREVLİSİ
4. Öğrenim Durumu : DOKTORA

Derece	Alan-Tez Başlığı	Üniversite	Yıl
Lisans	FİZİK ÖĞRETMENLİĞİ	19 MAYIS ÜNİVERSİTESİ	2005-2010
Y. Lisans	YÜKSEK ENERJİ ve PLAZMA FİZİĞİ (TERMİYONİK VAKUM ARK (TVA) TEKNİĞİ İLE OPTİK FİLTRE TASARIMI)	ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ	2010-2013
Doktora	KATIHAL FİZİĞİ (TUNGSTEN KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN BORLANMASI VE KARAKTERİZASYONU)	ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ	2013-2019

5. Akademik Unvanlar

ÖĞRETİM GÖREVLİSİ (2014-)

6. Yayınlar

6.1 Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler

1) Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz, **Tuna Aydoğmuş**, Saliha Elmas, Soner Özen, Naci Ekem, M.Zafer Balbağ“ZnO thin film synthesis by reactive radio frequency magnetron sputtering” APPLIED SURFACE SCIENCE 318:2-5 · NOVEMBER 2014
DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.10.044

2) Suat Pat, Soner Özen, Volkan Şenay, **Tuna Aydoğmuş**, Saliha Elmas, Şadan Korkmaz, Naci Ekem, M.Zafer Balbağ “A study on optical, morphological and mechanical properties of Al₂O₃ ultra-thin films deposited by RF reactive magnetron sputtering” INTERNATIONAL JOURNAL OF SURFACE SCIENCE AND ENGINEERING 9(5):415-424 · JANUARY 2015 DOI: 10.1504/IJSURFSE.2015.072061

6.2 Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler.

1. S. Elmas, N. Ekem, S. Pat, M. Z. Balbag, M. Ozkan, ğ. Korkmaz, S. Temel, M.

Nebi, N. E. Cetin, M. Ozmumcu, **T.Aydogmus**, S. Pekdemir, O. Aydın, ‘Deposition of ITO Thin Films by Thermoionic Vacuum Arc (TVA) Technique’ 7th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR–7) June 27-July01 2011

2. M. Nebi, N. Ekem, S. Pat, M. Z. Balbag, M. Ozkan, ğ. Korkmaz, S. Temel, S.

Elmas, N. E. Cetin, M. Ozmumcu, **T.Aydogmus**, S. Pekdemir, O. Aydın, ‘Some Physical Properties of Deposited ZnO Thin Films by RF Sputter at Various Concentrations’ 7th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR–7) June 27-July01 2011

3. S. Temel, N. Ekem, S. Pat, M. Z. Balbag, M. Ozkan, ğ. Korkmaz, S. Elmas,

N. E. Cetin, M. Ozmumcu, M. Nebi, **T.Aydogmus**, S. Pekdemir, O. Aydın, ‘SiO₂-ZrO₂ Multilayer AR Coatings of Lenses by Thermionic Vacuum Arc (TVA) Technique’ 7th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR–7) June 27-July01 2011

4. **T.Aydogmus**, N. Ekem, S. Pat, M. Z. Balbag, ğ. Korkmaz, S. Temel, N. E. Cetin,

M. Ozmumcu, S. Elmas, M. Nebi, S. Pekdemir, ‘Deposited MgF₂ Thin Films by Thermionic Vacuum Arc (TVA)’ 28th International Physics Congress, Turkish Physical Society, 6-9 September 2011

5. S. Temel, N. Ekem, S. Pat, M. Z. Balbag, ğ. Korkmaz, M. Nebi, N. E. Cetin, M. Ozmumcu, S. Elmas, **T.Aydogmus**, S. Pekdemir, 'Multilayer Anti-Reflective Coatings of Mineral Lenses With Thermionic Vacuum Arc (TVA) Technique' 28th International Physics Congress, Turkish Physical Society, 6-9 September 2011
6. S. Pekdemir, S. Pat, N. Ekem, M. Z. Balbag, ğ. Korkmaz, S. Temel, N. E. Cetin, M. Ozmumcu, S. Elmas, M. Nebi, **T.Aydogmus**, 'Deposited AR Coatings of Pet Substrates by Thermionic Vacuum Arc (TVA) Technique' 28th International Physics Congress, Turkish Physical Society, 6-9 September 2011
7. M. Nebi, S. Pat, N. Ekem, M. Z. Balbag, ğ. Korkmaz, S. Temel, N. E. Cetin, M. Ozmumcu, S. Elmas, **T.Aydogmus**, S. Pekdemir, 'Investigation of Some Physical Properties of Deposited GaAs Thin Films by RF Sputtering' 28th International Physics Congress, Turkish Physical Society, 6-9 September 2011
8. S. Elmas, N. Ekem, S. Pat, M. Z. Balbag, ğ. Korkmaz, S. Temel, M. Nebi, N. E. Cetin, M. Ozmumcu, **T.Aydogmus**, S. Pekdemir, 'Some Physical Properties of Deposited ITO Thin Films by Thermionic Vacuum Arc (TVA) Technique' 28th International Physics Congress, Turkish Physical Society, 6-9 September 2011
9. **T.Aydogmus**, N. Ekem, S. Pat, ' Ta₂O₅-MgF₂ Monolayer and Multilayer AntiReflective Coatings by Thermionic Vacuum Arc (TVA) Technique' 29th International Physics Congress, Turkish Physical Society, 5-8 September 2012
10. **T.Aydogmus**, N. Ekem, S. Pat, ' ZnS Thin Films Deposition by Thermionic Vacuum Arc (TVA)' 29th International Physics Congress, Turkish Physical Society, 5-8 September 2012

- 11.** S. Elmas, ğ. Korkmaz, S. Pat, **T.Aydogmus**, 'Investigation of Structural, Electrical and Surface Properties of ITO Thin Films Prepared by Thermionic Vacuum Arc (TVA)' Chemical Physics Congress X, TOBB University of Economics and Technology, 10-12 October 2012
- 12.** **T.Aydogmus**, N. Ekem, S. Pat, " Some Physical Properties of Deposited ZnS Thin Films by Thermionic Vacuum Arc (TVA) Technique " 9th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR-9) 24-28 June 2013
- 13.** V. Senay, S. Pat, S. Korkmaz, **T.Aydogmus**, S. Elmas, S. Özen, N. Ekem, M.Z. Balbag, " ZnO Thin Film Synthesis by Reactive Radio Frequency Magnetron Sputtering" 9th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR-9) 24-28 June 2013
- 14.** **T.Aydogmus**, N. Ekem, S. Pat, S. Korkmaz, M.Z. Balbag, S. Elmas, S. Özen, V. Senay, " Cr₂O₃ Thin Film Synthesized by Reactive Magnetron Sputtering" 30th International Physics Congress, Turkish Physical Society, 2-5 September 2013
- 15.** **T.Aydogmus**, N. Ekem, S. Pat, S. Korkmaz, M.Z. Balbag, S. Elmas, S. Özen, V. Senay, " Au/Pd Thin Film Deposition by Magnetron Sputtering Technique" 30th International Physics Congress, Turkish Physical Society, 2-5 September 2013
- 16.** M.Gökce, **T.Aydogmus**, S. Pat, " Some Physical Properties of ZnN Thin Films Deposition by Radio Frequency Reactive Magnetron Sputtering" 30th International Physics Congress, Turkish Physical Society, 2-5 September 2013
- 17.** Suat Pat, Naci Ekem, M.Zafer Balbağ, ğadan Korkmaz, **Tuna Aydoğmuş**, Soner

Özen, Volkan Şenay, "Reactive Thermionic Vacuum Arc (R-TVA) System" The International Middle East Plasma Science (IMEPS), 23-25 April 2014

18. Birol Geçici, Şadan Korkmaz, Soner Özen, Volkan Şenay, **Tuna Aydoğmuş**, Suat Pat, "Copper Oxide Thin Film Production by Reactive RF Magnetron Sputtering" 7th International Ege Energy Symposium & Exhibition, 18-20 June 2014

19. T.Aydogmus, D.Peker, S.Akkabak " İnce Film Teknolojisinde Sol-Jel Metodu" 31th International Physics Congress, Turkish Physical Society, 21-24 July 2014

20. Bünyamin Çiçek, Polat Topuz, **Tuna Aydoğmuş**, Yavuz Sun, "Magnezyum Matrisli Parçacık Takviyeli Kompozit malzemelerde Yapay Yaşlandırma Isıl İşleminin Sertlik ve Mikroyapı Üzerine Etkisi" Uluslararası Katılımlı 3. Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, 05-07 Kasım 2015 KUŞADASI

21. Tuna Aydoğmuş, Derya Peker, Polat Topuz, "The Fracture Toughness of Fe₂B Formed on Boronized Nitriding Steel" 33th International Physics Congress, Turkish Physical Society 6-10 September 2017

22. Polat Topuz, **Tuna Aydoğmuş**, Derya Peker, "Kinetic Investigations of Boronized 60WCrV8 and X210Cr12 Tool Steels" 33th International Physics Congress, Turkish Physical Society 6-10 September 2017

23. Derya Peker, Mehmet Peker, **Tuna Aydoğmuş**, Veysel Ataş, "Preparation and Characterization of TiO₂ Films Produced by Sol-Gel Spin Coating Method" 33th International Physics Congress, Turkish Physical Society 6-10 September 2017

6.3 Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler

1. T.Aydoğmuş, N. Ekem, S. Pat, 'Farklı Tabanlar Üzerine Termiyonik Vakum Ark (TVA) Yöntemi ile Büyütülen ZnS Yarıiletken İnce Filmlerinin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi' III. ULUSAL GÜNEŞ ve HİDROJEN ENERJİSİ KONGRESİ, 14-15 HAZİRAN 2012

2. P. İçme, T. Aydoğmuş, B. Deveci, N. Ekem, S. Pat, 'Termiyonik Vakum Ark (TVA) ile Yansıma Azaltılmış Ta₂O₅ Yüzeylerin Oluşturulması' III. ULUSAL GÜNEŞ ve HİDROJEN ENERJİSİ KONGRESİ, 14-15 HAZİRAN 2012

3. A. Kılıç, T. Aydoğmuş, S. Pat, 'Termiyonik Vakum Ark (TVA) Yöntemi ile Üretilen ZnS Yarıiletken Nano Yapıların İncelenmesi' III. ULUSAL GÜNEŞ ve HİDROJEN ENERJİSİ KONGRESİ, 14-15 HAZİRAN 2012

4. T.Aydoğmuş, D. Peker, 'İnce Film Güneş Enerjisi Teknolojisinde Sol-Jel Yöntemi' IV. ULUSAL GÜNEŞ ve HİDROJEN ENERJİSİ KONGRESİ, 22-23 MAYIS 2014

6.4 Diğer yayınlar

1. Tuna Aydoğmuş, "Tahribatsız Muayene Yöntemleri" TSE Standard Dergisi, Mart 2016

7. Projeler

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi 201219026 numaralı, Doç. Dr. Suat PAT'ın yürüttüclüğünü yaptığı BAP projesinde araştırmacı personel, 2013

8. İdari Görevler

GÜYEM Müdür Yardımcılığı (2014-2016)

Tahribatsız Muayene Program Başkanlığı (2015-)

9. Dergi Hakemlikleri

1. Marmara Fen Bilimleri Dergisi Makale Hakemliği