İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İYON BORÜRLENMİŞ KESME TAKIMLARINDA PERFORMANS ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Süleyman BAŞTÜRK

Anabilim Dalı : Makina Mühendisliği

Programı : Konstrüksiyon ve İmalat

MART 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İYON BORÜRLENMİŞ KESME TAKIMLARINDA PERFORMANS ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ
Süleyman BAŞTÜRK
(503002204)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Kasım 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Mart 2010

Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Muzaffer ERTEN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Barlas ERYÜREK (İTÜ)
Prof.Dr. Necati TAHRALI (YTÜ)
Prof.Dr. Erhan ALTAN (YTÜ)
Doç.Dr. Turgut GÜLMEZ (İTÜ)

MART 2010

Eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, çok uzun ve yorucu bir çalışma sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu tez çalışmasında emeği geçen ve aşağıda ismi belirtilen/belirtilemeyen herkese sonsuz şükranlarımı sunuyorum.
Tezimin her aşamasında göstermiş olduğu büyük destek ve yönlendirmesinden dolayı tez danışmanım Yrd.Doç.Dr. Muzaffer ERTEN'e;
Deney düzeneğinin hazırlanması, imal ettirilmesi ve çalıştırılması sürecinde göstermiş olduğu üstün destek ve katkılarından dolayı Doç.Dr. Turgut GÜLMEZ'e;
Deney düzeneğinin faal hale getirilmesi sürecinde yapmış olduğu destekten dolayı emekli öğretim üyesi Prof.Dr. Mehmet ÇAPA'ya;
Talaş kaldırma deneylerinin Koç Üniversitesi'nde yapılması için gerekli ortamı sağlayan Doç.Dr. İsmail LAZOĞLU ve Koç Üniversitesi'ne;
Talaş kaldırma deneylerini büyük bir özveriyle yapan Koç Üniversitesi'nden Araş.Gör. Fatih ŞENBABAOĞLU ve Araş.Gör. Coşkun İSLAM'a;
Deney düzeneğinin dizaynı sürecinde büyük katkıları olan ve imalini gerçekleştiren CEMAŞ Makine San.Tic.Ltd.Şti.'den Sn. Atilla CEYİŞAKAR'a ve atölye personeline;
Yeni güç kaynağının teminini sağlayan Prof.Dr. Şafak YILMAZ'a;
XRD ölçümlerinin yapılmasını sağlayan Y.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Dekanı Prof.Dr. Sabriye PİŞKİN'e;
SEM ölçümlerinin yapılmasını sağlayan İ.T.Ü. Metalurji Müh. Böl. Öğretim üyesi Doç.Dr. Gültekin GÖLLER ve laboratuvar personeline;
SEM görüntülerinin bir kısmının alınmasını sağlayan Arçelik A.Ş:'den Sn. Turgay GÖNÜL'e;
Deney düzeneğinin hazırlanması ve malzeme inceleme sürecinde her zaman desteğini esirgemeyen Dr.Hv.Müh.Yb. Ali BAŞARAN'a ve önerileriyle destek olan Dr.Hv.Müh.Yb. Aydemir ARISOY, Hv.Müh.Bnb. Serdar AY ve Yrd.Doç.Dr.Hv.Müh.Bnb. İbrahim KOÇ'a;
Kesici uçların teminini sağlayan BÖHLER Sert Maden ve Takım San.Tic.A.Ş.'ye;
Deney düzeneğinin faal hale getirilmesinde karşılaştığım her türlü problemde yardımcı olan İ.T.Ü. Makina Fakültesi Numune Hazırlama Atölyesi personeli Osman ÇELEBİ ve Erdal DİNÇ'e, ayrıca elektrik teknisyeni Oktay KARCIOĞLU'na;
Talaş kaldırma testleri için gerekli olan Ti-6Al-4V malzemeyi sağlayan General Electric-Türkiye'ye sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunuyorum.
Ayrıca Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü (HUTEN) Personeline ve Hava Kuvvetleri Komutanlığı'na bana bu çalışma için vermiş oldukları imkan ve destek dolayısıyla teşekkürlerimi sunuyorum.
Tez çalışmam sürecinde manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen babama, anneme ve kardeşlerime de şükranlarımı sunuyorum.
Son olarak tez çalışmam esnasında büyük fedakârlıklar gösteren ve büyük bir sabır ve anlayışla her zaman destek olan eşime de teşekkür ediyor, bu çalışmayı eşim Ünzüle BAŞTÜRK ile çocuklarım Zeki Rıdvan ve Okan Alp'e ithaf ediyorum.

Mart 2010 Süleyman BAŞTÜRK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Amaç 1
1.2 Borlama 5
1.2.1 Borlamanın ısıl işlemler içindeki yeri 6
1.2.2 Borlama işlemi ile yüzey sertleştirme 8
1.2.2.1 Katı ortamda borlama 8
1.2.2.2 Sıvı ortamda borlama 9
1.2.2.3 Gaz ortam borlaması 10
1.2.2.4 Pasta (macun) ile borlama 11
1.2.3 Borür tabakasının fiziksel ve kimyasal özellikleri 11
1.2.3.1 Tabaka kalınlığı 11
1.2.3.2 Sertlik 13
1.2.3.3 Aşınma 15
1.2.3.4 Artık gerilmeler 16
1.2.3.5 Korozyon direnci 17
1.2.4 Borlanabilen malzemeler 17
1.2.5 Borlama ile ilgili diğer çalışmalar 18
1.3 Plazma (İyon) Borlama 31
1.4 Ortogonal Talaş Kaldırma Teorisi 36
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **41**
2.1 WC Kesici Takım Uçları 41
2.2 Deney Planı 43
2.3 Deney Tertibatı 45
2.4 Deneylerin Yapılışı 50
2.4.1 Talaş kaldırma performansı ölçümleri 50
2.4.1.1 Alın frezelemede kesme kuvvetleri 50
2.4.1.2 Kesme kuvveti ölçümleri 52
2.4.2 Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri 54
2.4.3 Ortogonal talaş kaldırma deneyleri 54
2.4.4 Aşınma testleri 56
2.4.5 XRD ölçümleri 56
2.5 SEM Ölçümleri 57
2.5.1 Mikrosertlik ölçümleri 57

3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME 59
3.1 Deney Sonuçları 59
3.1.1 Kesme kuvveti ölçüm sonuçları 59
3.1.2 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları 66
3.1.3 Ortogonal talaş kaldırmada kesme kuvveti ölçüm sonuçları 73
3.1.4 Aşınma testleri ölçüm sonuçları 79
3.1.5 XRD ölçüm sonuçları 82
3.1.6 SEM ölçüm sonuçları 85
3.1.7 Mikrosertlik ölçüm sonuçları 87
3.1.7.1 Yüzeyden mikrosertlik ölçümü sonuçları 87
3.1.7.2 Kesitten mikrosertlik ölçümü sonuçları 94
3.2 Değerlendirme 95
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 103
4.1 Sonuçlar 103
4.2 Öneriler 104
KAYNAKLAR 107
EKLER 113
ÖZGEÇMİŞ 123

KISALTMALAR

AISI : American Iron and Steel Institute
Ar : Argon
B : Bor
C : Karbon
CBN : Cubic Boron Nitride
CNC : Computer Numerical Control
Co : Kobalt
CVD : Chemical Vapor Deposition
DC : Doğru Akım
F : Flor
Fe : Demir
H : Hidrojen
HV : Vickers sertlik birimi
Nb : Neobyum
SEM : Taramalı elektron mikroskobu (Scanned Elektron Microscope)
T/M : Toz Metal
W : Tungsten/Wolfram
XRD : X Işını Difraksiyonu (X-Ray Diffraction)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.2 : Sıvı ortam borlamasında kullanılan ana bor kaynakları 10
Çizelge 1.3 : Gaz halindeki borlayıcı bileşikler ve bazı özellikleri 10
Çizelge 1.4 : Farklı malzeme bor tabaka sertlikleri ve erime noktaları 13
Çizelge 1.5 : Borlama ile diğer yüzey sertleştirme işlemleri sertlik değerleri 14
Çizelge 1.6 : Bazı malzemelerin sürtünme katsayılarının karşılaştırılması 15
Çizelge 1.7 : Borür tabakası ve saf demire ait ısıl genleşme katsayıları 16
Çizelge 2.1 : Plazma borlama deney planı 43
Çizelge 2.2 : Alın frezeleme işleme şartları 54
Çizelge 3.1 : Maksimum bileşke kesme kuvvetleri. 59
Çizelge 3.2 : Bileşke kesme kuvvetindeki % iyileşmeler. 64
Çizelge 3.3 : Kesici uç kenar yarıçap değerleri. 66
Çizelge 3.4 : Yüzey pürüzlülüğü R_a (μm). 67
Çizelge 3.5 : Yüzey pürüzlülüğü R_z (μm). 67
Çizelge 3.6 : Yüzey pürüzlülüğü R_q (μm). 68
Çizelge 3.7 : Ortogonal kesmede ölçülen talaş kalınlığı ve kuvvetler. 74
Çizelge 3.8 : Hesaplanan kenar ve kayma kuvvetleri ile K katsayıları. 76
Çizelge 3.9 : Sürtünme açıları ve sürtünme katsayıları. 77
Çizelge 3.10 : Kayma açısı (Ø) ve kayma gerilmesi (τ) değerleri. 78
Çizelge 3.11 : Serbest yüzey aşınma değerleri (VB). 79
Çizelge 3.12 : Talaş yüzeyi aşınma alanı değerleri. 79
Çizelge 3.13 : Yüzeyden alınan Vickers mikrosertlik değerleri. 88
Çizelge 3.14 : Yüzeyden alınan ortalama Vickers mikrosertlik değerleri. 89
Çizelge 3.15 : Kenar bölge ortalama Vickers mikrosertlik değerleri. 91
Çizelge 3.16 : Hollomon-Jaffee parametreleri 93
Çizelge 3.17 : Kesitten alınan ortalama Vickers mikrosertlik değerleri. 94
Çizelge 3.18 : Ömür, mikrosertlik ve sürtünme katsayısı değerleri. 101

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Isıl işlem yöntem ve çeşitleri 7
Şekil 1.2 : Ck 45 çeliğinin tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklıkla değişimi 12
Şekil 1.3 : Borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımları 15
Şekil 1.4 : İyon nitrürleme ile oluşan faz yapıları 32
Şekil 1.5 : İyon nitrürlemede akım boşalım mekanizması 34
Şekil 1.6 : Ortogonal kesme. 36
Şekil 1.7 : Ortogonal kesme modelinde oluşan kuvvetler. 37
Şekil 2.1 : BÖHLER SPKN 1203 ED-R tungsten karbür kesici uç. 42
Şekil 2.2 : Plazma oluşumu. 44
Şekil 2.3 : Plazma borlanmış 9 numaralı numune. 44
Şekil 2.4 : Plazma borlama deney düzeneği. 45
Şekil 2.5 : Plazma borlama deney odası. 47
Şekil 2.6 : Deney Odasının açılmış hali. 47
Şekil 2.7 : Su soğutma sistemi. 48
Şekil 2.8 : U tipi civalı manometre. 48
Şekil 2.9 : (a) BF_3 gazının bulunduğu tüp, (b) Argon ve Hidrojen gaz tüpleri. 48
Şekil 2.10 : Gaz akış kontrol sistemi. 49
Şekil 2.11 : Vakum pompası. 49
Şekil 2.12 : Doğru akım güç kaynağı. 49
Şekil 2.13 : Kesici uçların deney odasına yerleştirilmesi. 50
Şekil 2.14 : Alın frezeleme takımı [76]. 51
Şekil 2.15 : Kuvvet ölçüm dinamometresi. 51
Şekil 2.16 : Çok kanallı veri toplama sistemi (DAQ). 52
Şekil 2.17 : Kuvvet ölçümü. 52
Şekil 2.18 : Mazak FJV-200 UHS CNC işleme merkezi. 53
Şekil 2.19 : Ti-6Al-4V iş parçası. 53
Şekil 2.20 : Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı. 54
Şekil 2.21 : Mazak NEXUS 150 CNC torna tezgahı ve dinamometre. 55
Şekil 2.22 : Ortogonal testlerin yapıldığı iş parçası ve dinamometre. 55
Şekil 2.23 : Panalytical X'Pert PRO XRD cihazı. 56
Şekil 2.24 : Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu. 57
Şekil 2.25 : Shimadzu HMV-2L mikrosertlik ölçüm cihazı. 57
Şekil 3.1 : 200 d/dk'da bileşke kesme kuvvetleri. 60
Şekil 3.2 : 350 d/dk'da bileşke kesme kuvvetleri. 60
Şekil 3.3 : 500 d/dk'da bileşke kesme kuvvetleri. 61
Şekil 3.4 : 650 d/dk'da bileşke kesme kuvvetleri. 61
Şekil 3.5 : 10 mm/dk ilerleme hızında bileşke kesme kuvvetleri. 62
Şekil 3.6 : 20 mm/dk ilerleme hızında bileşke kesme kuvvetleri. 62
Şekil 3.7 : 30 mm/dk ilerleme hızında bileşke kesme kuvvetleri. 63
Şekil 3.8 : 40 mm/dk ilerleme hızında bileşke kesme kuvvetleri. 63
Şekil 3.9 : Bileşke kesme kuvvetindeki % iyileşmeler. 64
Şekil 3.10 : 4 Numaralı kesici uç bileşke kuvvet değişimi. 65

Şekil 3.11 : 9 Numaralı kesici uç bileşke kuvvet değişimi. 65
Şekil 3.12 : 200 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_a değeri. 68
Şekil 3.13 : 350 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_a değeri. 69
Şekil 3.14 : 500 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_a değeri. 69
Şekil 3.15 : 650 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_a değeri. 70
Şekil 3.16 : 200 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_z değeri. 70
Şekil 3.17 : 350 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_z değeri. 70
Şekil 3.18 : 500 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_z değeri. 71
Şekil 3.19 : 650 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_z değeri. 71
Şekil 3.20 : 200 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_q değeri. 71
Şekil 3.21 : 350 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_q değeri. 72
Şekil 3.22 : 500 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_q değeri. 72
Şekil 3.23 : 650 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_q değeri. 72
Şekil 3.24 : 4 numaralı ucun 650 d/dk'da yüzey pürüzlülüğü değerleri. 73
Şekil 3.25 : Bileşke ortogonal kesme kuvvetleri. 74
Şekil 3.26 : Dinamometreden alınan kesme kuvvetleri (Fc). 75
Şekil 3.27 : Dinamometreden alınan teğetsel kuvvetler (Ft). 75
Şekil 3.28 : Talaş oranı (r). 75
Şekil 3.29 : Etkin sürtünme katsyısı (μ)..... 77
Şekil 3.30 : Kayma gerilmesi (τ). 78
Şekil 3.31 : Serbest yüzey aşınma değerleri (VB). 80
Şekil 3.32 : Talaş yüzeyi aşınma alanı değerleri. 80
Şekil 3.33 : Aşınma testleri sonucunda alınan 50X büyütmeli SEM görüntüleri. 81
Şekil 3.34 : 4 numaralı numune XRD ölçümü sonucu. 82
Şekil 3.35 : 7 numaralı numune XRD ölçümü sonucu. 83
Şekil 3.36 : 9 numaralı numune XRD ölçümü sonucu. 84
Şekil 3.37 : 13 numaralı numune XRD ölçümü sonucu. 84
Şekil 3.38 : 14 numaralı numune XRD ölçümü sonucu. 85
Şekil 3.39 : (a) 0 numaralı numune, (b) 9 numaralı numune SEM görüntüleri. 86
Şekil 3.40 : 0 ve 9 numaralı numunelerin 3000X kompozisyon görüntüleri. 86
Şekil 3.41 : **(**a) 9 numaralı numunenin LS atom analizi, **(**b) Bor atomu değişimi. 87
Şekil 3.42 : 0-8 arası numunelerin ortalama Vickers mikrosertlik değerleri. 89
Şekil 3.43 : 9-16 arası numunelerin ortalama Vickers mikrosertlik değerleri. 90
Şekil 3.44 : Zamana göre kenar bölge ortalama mikrosertlik değişimi. 91
Şekil 3.45 : Sıcaklığa göre kenar bölge ortalama mikrosertlik değişimi. 92
Şekil 3.46 : Hollomon-Jaffee parametresi-ortalama sertlik değişimi. 94
Şekil 3.47 : Kesit ve yüzey kenar bölge mikrosertlik değişimi. 95
Şekil A.1 : 0, 4 ve 7 numaralı uçların serbest yüzey optik mikroskop görüntüleri. 114
Şekil A.2 : 9, 13 ve 14 nu.lı uçların serbest yüzey optik mikroskop görüntüleri. ... 115
Şekil A.3 : 0, 4 ve 7 numaralı uçların talaş yüzeyi görüntüleri (0-90 sn). 116
Şekil A.4 : 0, 4 ve 7 numaralı uçların talaş yüzeyi görüntüleri (120-540 sn). 117
Şekil A.5 : 0, 4 ve 7 numaralı uçların talaş yüzeyi görüntüleri (900-2340 sn). 118
Şekil A.6 : 9, 13 ve 14 numaralı uçların talaş yüzeyi görüntüleri (0-90 sn). 119
Şekil A.7 : 9, 13 ve 14 numaralı uçların talaş yüzeyi görüntüleri (120-540 sn). 120
Şekil A.8 : 9, 13 ve 14 numaralı uçların talaş yüzeyi görüntüleri (900-2340 sn). ... 121

SEMBOL LİSTESİ

A_s	: Kayma düzlemi alanı
α	: Talaş açısı
β	: Sürtünme açısı
β_s	: Kayma bölgesindeki sürtünme açısı
F	: Sürtünme kuvveti
F_c	: Kesme kuvveti
F_{ce}, F_{te}	: Takım kenarında oluşan kuvvet bileşenleri
F_{cs}, F_{ts}	: Makaslama (kayma) bölgesinde oluşan kuvvet bileşenleri
$Ø$	: Makaslama (kayma) açısı
F_s	: Makaslama (kayma) kuvveti
F_n	: Normal kuvvet
F_R	: Bileşke kesme kuvveti
F_t	: Teğetsel kuvvet
F_X	: X yönünde kesme kuvveti
F_Y	: Y yönünde kesme kuvveti
Fz	: Z yönünde kesme kuvveti
H.P.	: Hollomon-Jafeee Parametresi
K_{tc}, K_{fc}	: Kesme sabitleri
K_{te}, K_{fe}	: Kenar katsayıları
l_s	: Kayma düzlemi genişliği
μ	: Sürtünme katsatyısı
N	: Normal kuvvet
R	: Bileşke kuvvet
r	: Talaş oranı
R_a	: Yüzey Pürüzlülüğü Aritmetik Ortalaması
R_q	: RMS (Root Mean Square) düzeltilmiş yüzey pürüzlülüğü
R_z	: TPM (Tribological Profile Microscope) yüzey pürüzlülüğü
t_c	: Talaş kalınlığı
t_0:	: Kesme derinliği (tornalamada ilerleme)
τ	: Kayma gerilmesi
V	: Kesme hızı
VB	: Serbest yüzey aşınması
w	: Kesme genişliği

İYON BORÜRLENMİŞ KESME TAKIMLARINDA PERFORMANS ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Sinterlenmiş karbürler talaşlı imalatta kesici uç olarak uzun yıllardan beri çok geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Tungsten karbürler (WC) ise kesici uç imalinde en çok kullanılan malzemelerden biridir. Bu çalışmada, talaşlı imalatta oldukça yaygın bir şekilde kullanılan tungsten karbür kesme takımlarının plazma (iyon) borürlenmesi yapılarak bu işlemin havacılık ve biyomedikal sanayiinde yaygın bir şekilde kullanılan Ti-6Al-4V malzemelerin yüzey frezelenmesi işleminde oluşan kesme kuvvetleri ve iş parçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiş, ayrıca ortogonal kesme ve aşınma testleri yapılmış ve plazma borlamanın ortogonal kesme parametrelerine etkisi ile takım ömrüne etkisi incelenmiştir. Plazma borlanmış takımlara ayrıca XRD ve SEM ölçümleri de yapılarak plazma borlama sonucunda oluşan bileşikler ve bor nüfuziyet bölgesi incelenmiştir. Ayrıca kesici takımların yüzeyinden ve kesitinden mikrosertlik ölçümleri de yapılarak plazma borlamanın takım sertliğine etkisi incelenmiş ve tüm analizlerin sonuçları değerlendirilmiştir.

Plazma borlama işlemini gerçekleştirebilmek amacıyla yeni bir deney düzeneği imal edilerek plazma borlama işlemi 600, 700, 800 ve 850 ^{o}C'de, 1, 2, 4 ve 6 saatlik sürelerle ve % 10 BF_3, %40 Argon, %50 H_2'den oluşan gaz karışım oranında yapılmıştır.

Plazma borlama sonrasında kesici uçlara Ti-6Al-4V malzemeler üzerinde 200, 350, 500 ve 650 d/dk devir sayılarında ve 10, 20, 30, 40 mm/dk ilerleme ve 0.5 mm kesme derinliğinde CNC işleme mekezinde alın frezeleme testleri yapılmıştır. Alın frezeleme testleri esnasında yapılan kuvvet ölçümleri sonucunda; 200, 350 ve 500 d/dk devir sayılarında 600 ^{o}C'de 6 saat süreyle plazma borlanmış olan kesici ucun bileşke kesme kuvvetinde en iyi iyileşmeyi sağladığı; 650 d/dk devir sayısında ise yani yüksek kesme hızında (V= 163,36 m/dk) 800 ^{o}C'de 1 saat süreyle plazma borlanmış olan kesici ucun en yüksek iyileşmeyi sağladığı görülmüştür. Bileşke kesme kuvvetinde en yüksek yüzde iyileşmeyi %28.12 ile 350 d/dk'da işleme durumunda 600 ^{o}C'de 6 saat süreyle plazma borlanmış olan kesici ucun sağladığı görülmüştür.

Yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde plazma borlanmış ve borlanmamış numuneler arasında yüzey pürüzlülük değerleri açısından çok belirgin bir farklılık olmadığı görülmüştür.

Plazma borlanmış kesici uçlara CNC torna tezgahında ayrıca ortogonal kesme testleri de yapılmış ve ortogonal kesme esnasında oluşan bileşke kesme kuvvetleri, kayma kuvvetleri ve açıları, sürtünme kuvvetleri, açıları ve katsayıları ile kesme sabitleri elde edilmiş ayrıca kayma gerilmeleri de hesaplanmıştır. Plazma borlanmış numunelerde sürtünme katsayısının düştüğü, ayrıca kayma gerilme değerlerinde de borlanmamış kesici uçlara göre düşüş olduğu görülmüştür.

Plazma borlanmış kesici uçların takım ömrüne etkisini belirlemek amacıyla plazma borlanmış kesici uçlar Ti-6Al-4V malzeme üzerinde 70 m/dk kesme hızında değişik ilerlemelerde alın frezeleme ile aşınma testlerine de tabi tutulmuş ve yan yüzeyleri incelenerek maksimum serbest yüzey aşınması (VB) ölçülmüştür. Aşınma testleri sonucunda; borlanmamış kesici uç 21'inci dakikada (1260 sn) 303.43 μm sebest yüzey aşınma değerine değerine ulaşmakta iken, 600 ^{o}C'de 6 saat süreyle plazma borlanmış olan kesici uç 63'üncü dakikada 310.66 μm VB değerine, 800 ^{o}C'de 1 saat süreyle plazma borlanmış olan kesici uç ise 39'uncu dakikada 278.71 μm VB değerine ulaşmıştır. Bu verilere göre; 600 ^{o}C'de 6 saat süreyle plazma borlanmış olan kesici uç ile plazma borlanmamış kesici uca göre takım ömründe yaklaşık üç kat artış elde edilmiştir.

XRD ölçümleri ile plazma borlama sonrasında kesici takım yüzeyinde W_2B, W_2B_5 ve WB bileşiklerinin oluştuğu ve bu bileşiklerin WC kesici uçların aşınma dayanımlarına olumlu katkı sağladığı görülmüştür.

Plazma borlanmış kesici takımlara takımların kesiti alınarak SEM ölçümleri de yapılmış ve 800 ^{o}C'de 1 saat süreyle plazma borlanmış olan kesici uçta oluşan nüfuziyet tabakasının 185.6 μm kalınlığında olduğu ve bu bölgeye bor atomlarının nüfuz ettiği tespit edilmiştir.

Yüzeyden yapılan mikrosertlik ölçümleri sonucunda borlanmamış kesici ucun ortalama mikrosertlik değerinin 1536 HV değerinde olduğu belirlenmiş, buna karşılık plazma borlanmış diğer numunelerin yüzeyinde ölçülen noktasal mikrosertlik değerlerinin 1452 HV ila 3898 HV arasında değiştiği görülmüştür. Noktasal olarak değerlendirildiğinde 800 ^{o}C'de 4 saat süreyle borlanmış olan kesici uçta ölçülen mikrosertlik değerinde borlanmamış kesici uca göre 2.59 kat artış elde edilmiştir.

Sonuç olarak; plazma borlama işlemi tungsten karbür (WC) kesici takımlara başarıyla uygulanmış ve işlenmesi oldukça zor olan Ti-6Al-4V titanyum alaşımının frezelenmesinde takım ömründe yaklaşık üç kat artış sağlanmıştır. Yaklaşık olarak yapılan hesapla kesici uç başına plazma borlamanın maliyetinin %5 ek maliyet getirdiği değerlendirildiğinde, takım ömründe elde edilen bu üç katlık artış ile Ti-6Al-4V titanyum alaşımının işleme maliyetinin düşmesine büyük katkı sağlanacağı görülmüştür.

PERFORMANCE RESEARCH ON THE ION BORONIZED CUTTING TOOLS

SUMMARY

Sintered carbides have been used widely for long years in the manufacturing process as cutting tools. Tungsten Carbides (WC) are also one of the most used materials in the cutting tool manufacturing. In this study, tungsten carbides, used widely in the manufacturing process, have been ion (plasma) boronized and the effects of this process to the cutting forces occurred while the face milling operations, and to the surface roughness for the machining of the Ti6Al4V materials, which is widely used in the aerospace and biomedical industry, have been investigated, and in addition, the orthogonal cutting tests and the wear tests have been performed and effects of the plasma boronizing to the orthogonal cutting parameters and to the tool life have been investigated. The compounds which become into being and the boron penetration region which are as a result of plasma boronizing have been investigated by making the XRD and SEM measurements to the plasma boronized tools.

In order to implement the plasma boronizing process, a new experimental set up has been manufactured and the plasma boronizing has been carried out at the temperatures of 600, 700, 800, and 850 ^{o}C, for 1, 2, 4 and, 6 hours of process times and with the gas combination of 10% BF_3, 40% Argon and 50% H_2.

After the plasma boronizing, the face milling operations using the CNC milling machine have been carried out to the cutting tools on the Ti-6Al-4V alloy at spindle speed of 200, 350, 500 ve 650 rpm, and the feedrates of 10, 20, 30, 40 mm/min., and 0.5 mm depth of cut.

After the plasma boronizing, a boride layer has been obtained on the side region of the cutting tools and to define the effects of this layer, the face milling of the inserts have been carried out and, the cutting forces have been measured by a dynamometer and, the surface roughness measurements have also been done. As a result of the cutting force measurements during the face milling experiments, it has been investigated that the inserts, which have been borided at 600 ^{o}C for 6 hours, showed the finest improvements on the resultant cutting forces for the 200, 350 and 500 rpm, and the inserts, which have been borided at 800 ^{o}C for 1 hour, showed the finest improvements on the resultant cutting forces for the 650 rpm. It has been seen that the inserts, which have been borided at 600 ^{o}C for 6 hours, have provided the finest percent improvement on the resultant cutting force as 28.12% at 350 rpm milling operation.

It has been investigated that there is no significant difference between the plasma borided and the unborided inserts in terms of surface roughness while analysing the surface roughness values.

In addition, the orthogonal cutting tests have been applied to the plasma boronized cutting tools using the CNC turning machine and the resultant cutting forces, the shear forces and angles, the friction forces, angles and coefficients, and the cutting

constants have been obtained, the shear stresses have been calculated as well. It has been seen on the plasma boronized cutting tools that the friction coefficient and the shear stresses values have decreased according to the unborided cutting tools.

In order to define the effects of the plasma boronized cutting tools to the tool life, the plasma boronized tools have been implemented to the wear tests by the face milling operations on the Ti-6Al-4V alloy at 70 m/min cutting speed and different feedrates, and by analyzing the side face, the maximum flank wear (VB) has been measured. At the end of the wear tests, unborided cutting tools have been reached to 303.43 μm VB values at 21st min. (1260sec.) while the plasma boronized cutting tools, which are boronized at 600 ^{o}C for 6 hours, have been reached to 310.66 μm VB values at 63rd minutes, and the plasma boronized cutting tools, whcih are boronized at 800 ^{o}C for1 hour, have been reached to 278.71 μm VB values at 39th minutes. According to these data, the tool life has been tripled with the plasma boronized cutting tools, which are boronized at 600 ^{o}C for 6hours according to the unborided cutting tools.

It has been investigated by the XRD measuremens after the plasma boronizing that, the W_2B, W_2B_5 and WB compounds have been formed on the surface of the cutting tools and these compounds affect to the wear strength positively.

Also SEM measurements have been done to the plasma boronized cutting tools by getting the cross-section of the tools, and it has been determined that the penetration layer in the cutting tools, whcih are boronized at 800 ^{o}C for1 hour, is 185.6 μm thick, and the boron atoms have been doped to this region.

At the end of the micro hardness measurements made on the surface, it has been seen that, the average micro hardness value of unborided cutting tools is 1536 HV, on the other hand, the point micro hardness values, which are measured on the other plasma boronized cutting tools' face, are varied between 1452 HV and 3898 HV. If the point measurements are considered, it has been obtained 2.39 times increase on the micro hardness values whcih are measuured on the cutting tools, whcih are boronized at 800 ^{o}C for1 hour, according to the unborided tools.

As a result, the plasma boronizing process has been implemented to the tungsten carbide (WC) cutting tools successfully, and the tool life is incerased triple for the milling of the Ti-6Al-4V titanium alloy whcih is extremly difficult to machine. If it is considered that the additional cost of plasma boronizing per insert is 5% by approximate calculation, it has been seen that with this obtained three-fold increase in the tool life will contribute greatly to the decrease in the machining costs of the Ti-6Al-4V titanium alloy.

1. GİRİŞ

1.1 Amaç

Talaşlı imalat, imalat sanayiinde önemli yer tutan ve yaygın bir şekilde kullanılan imalat yöntemlerinden birisidir. Talaşlı imalat içinde de tornalama ve frezeleme yöntemleri çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Talaşlı imalatta kesici takım olarak işlenecek olan malzeme özelliğine bağlı olarak değişik malzeme özelliklerine ve fiziksel özelliklere sahip kesici takımlar kullanılmaktadır. Talaşlı imalatta en yaygın bir şekilde kullanılan takım malzemeleri sinterlenmiş karbürlerdir. Bu takımlar çok sert olmaları, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya dayanıklı olmaları ve kesme hızının yüksek olması nedeniyle günümüzde talaşlı imalatta yaygın bir şekilde kullanım alanı bulmaktadırlar.

Sinterlenmiş karbürlerin aşınma dayanımının daha da arttırılması takım teknolojisinin önemli araştırma alanlarından bir tanesidir. Sinterlenmiş karbürlerin aşınma dayanımını arttırmak ve daha iyi bir performans elde edebilmek amacıyla mevcut teknolojiler ile kesici takımların üzerine TiC, TiN ve Al_2O_3 gibi değişik kaplamalar yapılmaktadır. Bu kaplamalar ile takım yüzey sertliği arttırılmakta, aynı zamanda takım ile iş parçası ve takım ile talaş arasındaki sürtünme katsayısının da düşük olması sağlanarak aşınma dayanımı arttırılmakta, dışı sert içi daha tok bir takımla daha derin ve hızlı talaş kaldırılması mümkün olmaktadır. Ancak bu yöntemlerde sinterlenmiş karbürler üzerine kaplama yapılmasından dolayı talaşlı imalat sırasında kaplamanın kalkması ve kesicin takımın ömrünü tamamlaması söz konusu olabilmektedir. Kaplamanın bu olumsuz etkisini ortadan kaldırmak amacıyla kaplama haricinde difüzyon proseslerini uygulamak mümkün olmaktadır. Bu difüzyon proseslerini plazma (iyon) nitrürleme ve plazma borlama olarak ikiye ayırmak mümkündür. Bu yöntemler ile sinterlenmiş karbür yüzeyinde farklı bileşikler oluşturarak takım performansının iyileştirilmesi sağlanabilmektedir. Tungsten karbür kesici takımlara plazma nitrürleme yapılması ile ilgili olarak Ufuk Özdemir ve Muzaffer Erten [1] tarafından bir çalışma yapılmış ve AISI 1020

malzemenin işlenmesi durumunda nitrürlenmemiş uçlara göre maksimum %81.3 takım ömründe artış sağlandığı görülmüştür.

Plazma (iyon) borlama ile ilgili olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde plazma borlamanın farklı malzemelere uygulandığı, ancak tungsten karbür (WC) kesici takımlara uygulamasının olmadığı görülmüştür. Plazma borlama ile ilgili yapılmış olan çalışmalar kısaca aşağıda sunulmuştur.

K.-T. Rie [2], plazma difüzyon proseslerindeki son gelişmeleri incelediği çalışmasında; otomobillerde kullanılan yağ pompası dişlilerini 750 ^{o}C de BCl_3 bileşiklerini kullanarak plazma (iyon) borürleme yapmış ve 20-30 μm kalınlığında ve 1500 kg mm^{-2} sertliğinde tabakalar elde etmiştir.

J.A. Davis ve diğ [3], demir ve AISI M2 çeliğini iyon implentasyonu ile borlamışlar ve bunların aşınma karakteristiklerini incelemişlerdir. Demir için 600 ^{o}C, M2 çeliği için de 700^{o}C sıcaklıkta yapılan iyon implentasyonunun aşınmaya dayanıklı bir tabaka elde etmek için yeterli olduğunu östermişlerdir.

R. Iakovou ve diğ. [4], takım çeliklerini plazma aktarımlı ark (plasma transferred arc) yöntemi ile borlamışlar ve bu yöntemin aşınma dayanımına etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak bu yöntemin 1.5 mm kalınlığında ve 1000-1300 HV sertliğinde üniform alaşımlanmış tabakalar oluşturulması için kolay ve etkili bir yöntem olduğunu belirlemişlerdir. Borlanmış tabakaların mikroyapılarına bakıldığında Fe_2B tabakası, borid ve martenzitin ötektik karışımından oluştuğu gözlenmiştir. Ötektik bölgede bazı çatlaklar görülmesine rağmen bunun kaplamanın adezyon aşınmasına karşı direnci üzerinde çok etkili olmadığını görmüşlerdir. Aşınma testi için kullanılan disk üzerindeki pimin aşınma oranı uygulanan yüke bağlı olarak değişmekle beraber kayma hızından hemen hemen bağımsız olduğu görülmüştür. Aşınma oranının 0.13 ila 0.23 arasında arasında değişen sürtünme katsayısına, sürtünme katsayısının da bor ve oksit tabakasına bağlı olduğu görülmüştür.

L. Bourithis ve diğ. [5] de plazma aktarımlı ark (plasma transferred arc) yöntemini kullanarak AISI 1018 çeliğini Bor ve Kromdiborit tozları kullanarak borlamışlardır. Bu çalışma sonucunda; bor tabakalarının Bor veya Kromdiborit tozları kullanılarak plazma aktarımlı ark yöntemiyle elde edilebileceğini, kaplama kalınlığının 1-1.5 mm kalınlığında, sertliğin de bor tozları için 1000 ila 1300 HV aralığında değiştiğini, Kromdiborit tozları için de 900 HV değerinde olduğunu, bor tozları ile borlanmış

yüzeylerin sürtünme katsayılarının uygulanan yüke göre 0.8 ila 0.2 arasında değiştiğini, Kromdiborit tozları ile borlanmış yüzeylerin sürtünme katsayılarının uygulanan yüke çok fazla bağlı olmadığını ve 0.15'ten düşük değerde olduğunu, aşınma oranının her iki yöntem için de 10^{-15} mm^3/m gibi çok düşük bir değerde olduğunu göstermişlerdir.

P. Kaestner ve diğ.[6], saf titanyumu ve $TiAl_6V_4$ alaşımını Ar-H_2-BCl_3 atmosferinde Pulsed-DC plasma borlama yöntemiyle: 700-900 ^oC sıcaklık aralığında 300-1500 Pa basınçta borlamışlardır. XRD ile yapılan inceleme sonucunda, proses parametrelerine bağlı olarak saf titanyumda ve $TiAl_6V_4$ alaşımında TiB_2 ve TiB oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Sistemden çıkan eksoz gazları Sodyum Hidroksit ile nötralize edilerek dışarıya atılmaktadır. Numuneler Ar-H_2 atmosferinde proses sıcaklığına gelene kadar temizlenmektedir (sputter cleaning). Borlama işleminden sonra sonra 50 ^oC ye kadar vakum altında soğutma yapmışlardır. 700 V civarında yüksek boron ve düşük klorin elde etmişlerdir. Yüksek sıcaklık ve yüksek plasma gücünde TiB_2 ve TiB elde etmişlerdir. Düşük sıcaklıklarda ise sadece TiB_2 nin oluştuğunu belirlemişlerdir. Yüzeydeki bor yoğunluğunu azaltmak için plasma gücü azaltıldığında ise sadece TiB nin oluştuğu belirlenmiştir. 850 ^oC'de 4 saat borlama sonucunda 2800 HK0.01 sertlik elde etmişlerdir.

E. Rodriguez Cabeo ve diğ. [7], demir esaslı malzemeleri kesikli doğru akım (pulsed-DC) plasma-destekli borlama ile Ar-H_2-BCl_3 atmosferinde 700-850 ^oC aralığında borlamışlardır. BCl_3 gazı %2.5 ila %15 arasında değişen oranlarda sisteme gönderilmiştir. Çelik malzeme içindeki boşlukların elimine edilmesinin sabit Ar-H_2-BCl_3 karışımı için büyük oranda boşalma (discharge) potansiyel değerine bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Boşluksuz bor tabakaları içeren dişliçarklar, yağ pompalarında kullanılmış ve aşınma testine tabi tutulmuştur. Plasma-destekli borlama ile mükemmel aşınma dayanımı elde edilmiş ve katı borlamaya bir alternatif olabileceği belirtilmiştir.

M. Darabara ve diğ. [8], düşük karbonlu çeliklerde plazma aktarımlı ark (Plasma Transferred Arc-PTA) yöntemiyle elde dilen Fe_2B-TiB_2 metal matris kompozitlerinin aşınma davranışını incelemişler ve tribolojik değerlendirmesini yapmışlardır. Araştırmaları sonucunda Fe-TiB_2-B sisteminde, TiB_2 ile birleşmeyen serbest haldeki B atomlarının, alaşım tabakasının tribolojik davranışını etkilediğini belirlemişlerdir. Karşı gövde malzemesi olarak çelik kullanıldığında, adhezyon aşınmasıyla kolayca

yok edilen daha kırılgan bir matris oluşumu sebebiyle serbest bor atomları aşınma oranını yükseltmektedirler. Buna karşılık karşı gövde malzemesi olarak alumina kullanıldığında, daha mukavim hale getirilmiş matris abrazyon aşınmasına direnç gösterdiği için aşınma oranının azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür. Sürtünme katsayısı değerleri ise takım çeliği bilyalarında alumina bilyalarına göre daha küçük olduğu, bunun da bunların farklı aşınma mekanizmalarına sahip olmalarından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Qin, L. Ve diğ. [9], Ti6Al4V alaşımını double glow discharge yöntemi kullanarak borlamışlar ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. İnceleme sonucunda, sürtünme katsayısı ve aşınma oranının borlanmaış malzemeye göre daha iyi olduğu görülmüştür. Bu da Ti6Al4V alaşımının borlanması suretiyle tribolojik özellikleri açısından endüstriyel kullanımının olabileceği sonucuna varılmıştır.

Yukarıda belirtilen özet literatür araştırması sonucunda, tungsten karbür kesici takımlara plazma borlama uygulanması ile ilgili olarak herhangibir çalışma yapılmadığı görülmüş ve tungsten ile bor elementinin W_xB_y bileşikleri oluşturduğu da tespit edilerek literatürdeki bu açığı araştırmak üzere bu tez çalışması hazırlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, talaşlı imalatta oldukça yaygın bir şekilde kullanılan tungsten karbür (WC) kesme takımlarının plazma (iyon) borlanması yapılarak bu işlemin havacılık ve biyomedikal sanayiinde yaygın bir şekilde kullanılan Ti-6Al-4V titanyum alaşımlarının talaş kaldırma performansına etkileri araştırılması hedeflenmiştir.

Tungsten karbür kesici takımlara plazma borlama işlemini yapabilmek amacıyla öncelikle ülkemizde bulunmayan bir deney düzeneği tasarlanmış ve imal ettirilerek plazma borlama işlemleri yapılmıştır. Plazma borlanmış kesici takımlar alın frezeleme işlemine tabi tutularak bu işlemde oluşan kesme kuvvetleri incelenmesi amaçlanmış, ardından torna ile ortogonal kesme testleri yapılmış, alın ferzeleme ile aşınma testleri yapılmış, XRD ve SEM analizleri yapılmış ve sertlik ölçümleri yapılarak sonuçların değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Sonuç olarak; plazma borlama işlemi tungsten karbür (WC) kesici takımlara başarıyla uygulanmış ve işlenmesi oldukça zor olan Ti-6Al-4V titanyum alaşımının frezelenmesinde takım ömrünü artırdığı görülmüştür. Yaklaşık olarak yapılan

hesapla kesici uç başına plazma borlamanın maliyetinin %5 ek maliyet getirdiği değerlendirildiğinde, takım ömründe elde edilen artış ile Ti-6Al-4V titanyum alaşımının işleme maliyetinin düşmesine büyük katkı sağlanacağı değerlendirilmiştir.

Tezin birinci bölümünün devam eden kısmında borlama ile ilgili geniş bir literatür taraması verilmiş, ikinci bölümde deneysel çalışmalar altında plazma borlama deneyleri ve ardından yapılan tüm ölçümler detaylı bir şekilde anlatılmış, üçüncü bölümde deney sonuçları kapsamında kesici takımlar üzerinde yapılan kuvvet ölçümleri, aşınma testleri, sertlik ölçümleri ve mikroyapı ölçümlerinin sonuçları verilmiş ve detaylı bir değerlendirme yapılmış, dördüncü bölümde ise tez kapsamında elde edilen sonuçlar ve ilave çalışmalar için öneriler belirtilmiştir.

1.2 Borlama

Bor ve bileşiklerinden faydalanılarak üretilen ürünlerle günlük hayatamınzın hemen her noktasında karşılaşmamız mümkün olmaktadır. Havacılık sanayiinden mutfak eşyalarına ve temizlik sektörüne, ilaç sanayisinden endüstrinin hemen hemen tüm dallarında bor ve bileşikleri kullanılmaktadır. Borun en yaygın kullanım alanlarından biri de matalurji endüstrisidir. Genel olarak bor ve bileşiklerinin en çok kullanıldığı tüketim alanları cam yünü, diğer camlar, yalıtım ürünleri, ateşe dayanıklı eşya, borosilikat camlar, sabun ve deterjanlar, porselen, emaye, sır (glazür), uçak ve otomotiv endüstrisi, tarım, metalurji, nükleer uygulama, inşaat, tekstil, ilaç ve kozmetik, fotoğrafçılık, yüksek enerji yakıtları, aşındırıcılar, elektrik aygıtları, refrakter, elektro kaplama banyoları, boyalar ve daha birçok uygulamalardır.

Bor'un en çok kullanım alanı metalurji sanayiidir. Bor saf şekilde metalurjik reaksiyonlarda bir oksijen giderici ve gaz giderici olarak kullanılır. Bor'un diğer önemli uygulama şekilleri, bazı özel alaşımlarda, yarı iletkenlerin yapımında, kataliz aracı olarak, abrasiflerde, metaller ve seramiklerde kuvvetlendirici unsur, ayrıca nükleer reaktörlerin konstrüksiyonunda yüksek-yoğunluklu betona bir katkı maddesi olarak, uranyum-grafit pillerinde bir kontrol aracı olarak nötronları absorblamak (bor çeliği veya B_4C) şeklindedir. Bor'un birçok önemli bileşikleri üretilmekte ve çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [10].

Borlama işlemi, demir esaslı malzemelere, demir dışı malzemelere ve toz metalurjisi ile üretilen malzemelere çok geniş bir alanda uygulanabilen bir termo-kimyasal yüzey sertleştirme işlemidir.

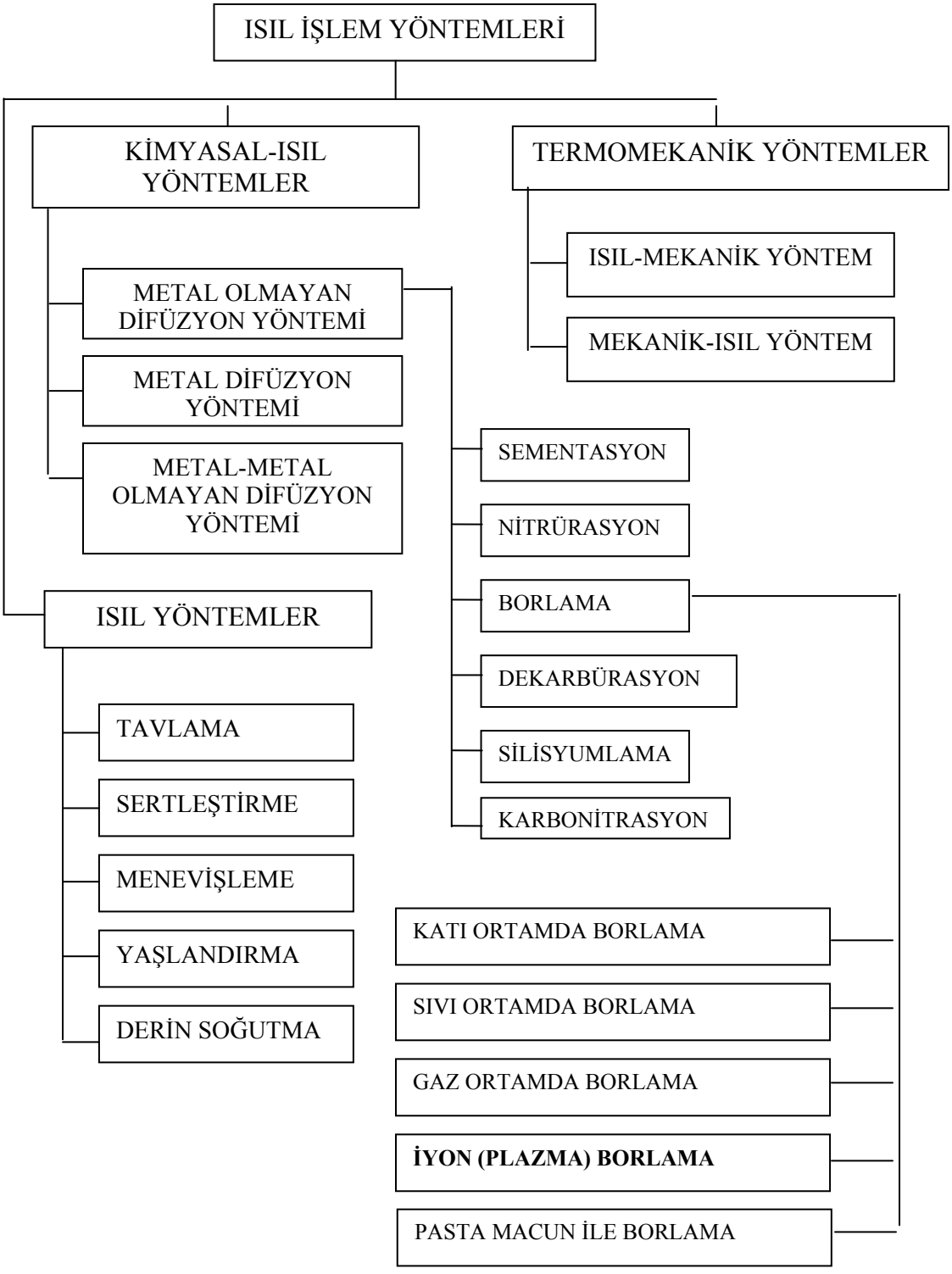
Bu işlem ile, yüzeyde bor ve demir atomlarının sıcaklığın etkisi ile kimyasal bileşik oluşturarak yüzeyde FeB ve Fe_2B tabakalarının birinin veya her ikisinin aynı anda oluşması sağlanır. Oluşan bu tabakalar malzemeye direnç ile birlikte korozyon ve aşınmaya karşı yüzeyde yaklaşık 2100 Vickers değerinde sertlik kazandırmaktadır.

1.2.1 Borlamanın ısıl işlemler içindeki yeri

Isıl işlem makine sanayiinde yaygın bir şekilde kullanılan yüzey şartlandırma prosesidir. Isı işlem; metal malzemelerde katı halde sıcaklık değişmeleri ile bir yada birbirine bağlı birkaç işlemle, amaca uygun olarak malzemenin özelliklerini değiştirerek istenen özelliklere getirme işlemi olarak tanımlanabilir. Isıl işlem prosesi, parçaların belli bir sıcaklığa kadar ısıtılması, bu sıcaklıkta uygun bir süre bekletilmesi ve belirli bir programa uygun olarak malzeme sıcaklığının oda sıcaklığına düşürülmesi şeklinde üç kademede gerçekleştirilmektedir.

Özellikle ihtiyaçlar ve gelişen teknolojinin sunmuş olduğu imkânlar sayesinde çok değişik ısıl işlem yöntemleri ortaya çıkmıştır. Örneğin malzemenin bütününün kimyasal bileşimini değiştirmek mümkün olduğu gibi, sadece yüzeyinin kimyasal bileşimini değiştirmek de mümkündür. Malzeme yüzeyinin sert ve aşınmaya dayanıklı, buna karşılık içyapının sünek olması arzu edildiğinde sadece yüzeyin sertleştirilmesine gidilir. Bunun için, yüzeyde belli bir derinliğe kadar sertleşme sağlayan yöntemler geliştirilmiştir. Kimyasal-ısıl yöntemler adı verilen sementasyon, nitrürasyon, karbonitrürasyon, metal olan ya da olmayan element ya da bileşiklerin difüzyonu gibi yöntemlerle malzemenin içyapısında bir değişim olmadığı halde yüzeyinde istenilen sertliği oluşturabilmek mümkündür. Şekil 1.1'de ısıl işlem yöntemleri ve çeşitleri gösterilmiştir.

Malzeme yüzeyinin sertleştirilmesinde; yüzeye karbon verilerek sertleştirme yapılabilir (sementasyonla yüzey sertleştirme) ya da yüzeye sertlik arttırıcı element atomları nüfuz ettirilebilir (nitrürasyonla sertleştirme, borlama). Ayrıca; iyi sertleşme kabiliyeti olan çeliklerin yüzeyinde, arzu edilen sertleşme derinliğine kadar olan kısmı ostenitleştirme sıcaklığına kadar ısıtılarak ve ardından ani soğutma ile bu bölgenin sertleştirilmesi de sağlanabilir (alevle ya da indüksiyonla yüzey sertleştirme). Bu yöntemlerin dışında yüzeye çelik bilyalar püskürterek, özel haddeleme yöntemleri uygulayarak soğuk şekil değiştirmeyle, kaynakla, püskürtme ya da galvanik kaplama (kromlama) yöntemleriyle yüzeyde sert bir tabaka oluşturmak da mümkündür.



Şekil **1.1** : Isıl işlem yöntem ve çeşitleri [10].

1.2.2 Borlama işlemi ile yüzey sertleştirme

Borlama termokimyasal bir yüzey sertleştirme yöntemi olup, esas olarak metal yüzeyine bor atomu difüzyonu olarak tanımlanabilir. Borlama teknik olarak oldukça geliştirilmiştir. Bor atomları ısı enerjisi etkisiyle metal yüzeyine yayınırlar ve esas metal atomlarıyla uygun borürler oluştururlar. Aynı zamanda yaygın şekilde sert ve aşınma direnci fazla tabakalar elde etmede kullanılmıştır. Bu işlem bor atomlarının metalik malzemelerin yüzeyinden içeriye doğru difüzyonu ile olmaktadır. İnce tabakalı Fe borür (Fe_2B) fazı özellikle endüstriyel uygulamalar için istenmektedir.

Borlama ortamı, bor kaynağı (amorf bor, B_4C, $Na_2B_4O_7$, B_2H_6,..), aktivatörler (KBF_4, NH_4F,..), dolgu ve deoksidantlardan (SiC, Al_2O_3) oluşur. Aktivatörler borür tabakasının düzenli gelişmesine etki ederler. Dolgu malzemesi ve deoksidantlar ise borlama esnasında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluştururlar ve borlama malzemesinin ana malzemeye yapışmasını önlerler. Borlama işlemi esnasında kullanılan yöntem, borlama malzemesinin bileşimi, borlanacak malzeme cinsi, işlem süresi ve işlem sıcaklığı elde edilen tabakaya etki eden faktörlerdir. Genel olarak çelik borlama ortamında 850 - 1000 ^{0}C sıcaklıkta 2 - 8 saat bekletilerek borlama gerçekleştirilir. Borlama dört ana grupta incelenmektedir. Bunlar; katı, sıvı, gaz ve pasta halinde bor verici gereç (macun) ile yapılan borlama ortamlardır [10].

1.2.2.1 Katı ortamda borlama

Borlama işlemine tabi tutulacak parça, toz halindeki bor verici ortam içinde genellikle 900-1000^{0}C sıcaklıkta 4-10 saat bekletilerek borlama işlemi gerçekleştirilir. Bir tür kutu sementasyona benzeyen bu yöntem, soy gaz atmosferinde yapılabileceği gibi sıkı kapatılmış kutularda olmak şartı ile normal atmosferde de yapılabilir. Borlanacak yüzeylerin etrafında elde edilmek istenen borür tabakasının özelliklerine göre tozların tane büyüklükleri 5-10 μm olmalıdır.

Borlama ortamının ana bileşeni bor karbür (B_4C), amorf bor ve ferro-bor olup bunların fiziksel özellikleri Çizelge 1.1'de verilmiştir. B_4C diğerlerine göre ucuz olduğundan tercih edilir.

Ana borlayıcı kaynağa ilave olarak NH_4Cl, BaF, $NaBF_4$, NH_4F, Na_2CO_3, KBF_4 ve Na_2AlF_6 gibi aktivatörler kullanılır.

Çizelge 1.1 : Katı ortam borlamasında kullanılan maddelerin bazı özellikleri [11].

Malzeme	Molekül ağırlığı	TeorikBor Miktarı (%)	Ergime Sıcaklığı (^{0}C)
Amorf Bor	10.82	95 - 97	2050
Ferro-Bor	-	17 - 19	-
Bor karbür	55.29	77.28	2450

Borlama işlemi sonucunda oluşan Fe2B ve FeB fazları arasındaki ısıl genleşme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlamalar meydana gelir. Bu durum bazı endüstriyel uygulamalar için borlamayı kabul edilemez hale getirir. Bu olumsuz etkiyi yok etmenin çaresi oluşan fazlardan birini azaltmak ya da ortadan kaldırmaktır. Bu faz FeB fazıdır. Katı ortam borlamasının kullanılması bu sonucu mümkün hale getirmiştir. H. P. Kehler tarafından bor kaynağı olarak B4C, aktivatör olarak KBF4, deoksidant ve dolgu malzemesi olarak SiC kullanılmıştır. Bu sayede tek fazlı (Fe2B) borür tabakalar ya da FeB oranının önemli ölçüde azaldığı tabakalar elde edilmiştir [12].

Katı borlamanın avantajları genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Ucuzdur,
- Özel bir yöntem gerektirmez,
- Kolay uygulanabilir,.
- Toz karşım oranları değiştirilebilir,
- Az ekipman ve düşük maliyet olarak sıralanabilir.

Dezavantaj olarak ise bor dağılımının her yerde eşit olmaması belirtilebilir [13].

1.2.2.2 Sıvı ortamda borlama

Bor verici ortam sıvıdır. Borlanacak malzeme, 800 - 1000 ^{0}C sıcaklıktaki bu ortamda 2-6 saat bekletilerek bor yayınımı gerçekleştirilir. Banyonun esas bileşenleri ve özellikleri Çizelge 1.2'de verilmiştir.

Çizelge 1.2 : Sıvı ortam borlamasında kullanılan ana bor kaynakları [10].

Malzeme	Formül	Molekül Ağırlığı	Teorik Bor Miktarı (%)	Ergime sıcaklığı (^{0}C)
Boraks	$Na_2B_4O_7.10H_2O$	381.42	11.35	-
Susuz Boraks	$Na_2B_4O_7$	201.26	21.50	741
Meta bor asidi	HBO_2	43.83	24.69	-
Sodyum bor florid	$NaBF_4$	109.81	9.85	-
Borik oksit	B_2O_3	69.64	31.07	450
Bor karbür	B_4C	55.29	78.28	2450

Sıvı ortama elektrik akımı (elektroliz) uygulanarak da borlama işlemi yapılabilir. Buna göre sıvı ortamdaki borlama "elektroliz" ve "normal sıvı ortam borlaması" olmak üzere ikiye ayrılır.

1.2.2.3 Gaz ortam borlaması

Gaz ortam borlamasında kullanılan maddelerin çoğu oldukça hassastır. Bunlar; BF_3, BCl_3, B_2H_6, $(C_2H_3)_3B$ dir. Bunlardan di boran (B_2H_6), H_2 ile beraber uygulandığında çok olumlu sonuçlar alınabilmektedir. Çizelge 1.3'de gaz halindeki borlayıcı bileşikler ve bazı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.3 : Gaz halindeki borlayıcı bileşikler ve bazı özellikleri [10].

Malzeme	Formül	Molekül ağırlığı	Teorik Bor Miktarı	Donma Noktası (^{0}C)
Bor triflorid	BF_3	67.82	15.95	-128.8
Bor triklorid	BCl_3	117.9	9.23	-107.3
Bor tribromid	BBr_3	250.57	4.32	-46
Di - boron	B_2H_6	26.69	39.08	-165.5
Bor trimetil	$(CH_3)_3B$	55.92	19.35	-161.5
Bor trietil	$(C_2H_5)_3B$	98.01	11.04	-94

Gaz ortamında borlamanın avantaj ve dezavantajlarını incelenirse, avantajları:

- Gaz sirkülâsyonunun bir sonucu olarak borun daha çok yayılması,
- Katı borlama işlemine göre gelişmiş sıcaklık kararlılığı ve elde etme kolaylığı olarak belirtilebilir.

Dezavantajları ise:

- Trimetil bor $(CH_3)_3B$ ise; borlama ile birlikte C yayınımına da neden olarak tabaka kalitesini bozar.
- Sistem pahalıdır.
- Ortam zehirlidir.
- Patlama tehlikesi yüksektir.

Bu dezavantajlar gaz ortamda borlama uygulanmasını sınırlamaktadır.

1.2.2.4 Pasta (macun) ile borlama

Katı ortam borlama yönteminde kullanılan tozların macun haline getirilerek kullanıldığı borlama yöntemidir. Bu yöntemin en önemli avantajı kısmi borlama yapılabilmesidir. Macun şeklindeki borlayıcı madde sertleştirilmek istenen yüzeye 2-5 mm kalınlıkta sürülür ve fırınlanmadan önce kuruması sağlanır. Kurutma işleminden sonra macunlanmış parçalar fırına konur ve uygun sıcaklıkta borlama işlemi yapılır [14]. Bu yöntemde borlamanın mutlaka koruyucu gaz ortamında yapılması gerekir. Toz borlamaya göre işlem süresi oldukça kısadır [15].

Borlama işleminden sonra numune üzerine macunun yapışması bu yöntemin önemli sakıncasıdır. Bu etkiyi azaltmak için Konopelski ve Dibko tarafından sulu sodyum silikat çözeltisi önerilmiştir. Ayrıca organik karakterli çeşitli çözeltiler ve %3 polivinil alkol ya da %0.5 metil selüloz içeren sulu çözeltilerde sözü edilen zorluğu azaltırlar [12].

1.2.3 Borür tabakasının fiziksel ve kimyasal özellikleri

1.2.3.1 Tabaka kalınlığı

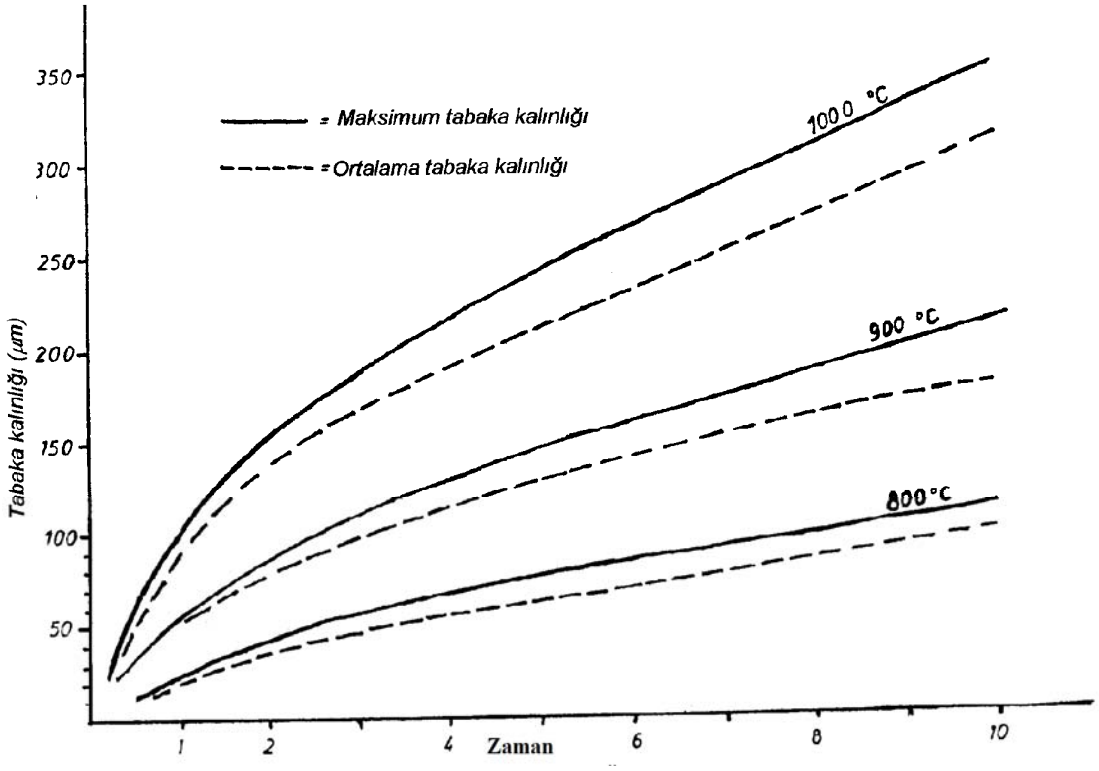
Borlanan malzemenin cinsi, borlayıcı ortamın bileşimi, işlem şekli, sıcaklık ve süre borür tabakasının kalınlığına etki eden faktörlerdir. Teorik olarak tabaka kalınlığı sınırsızdır. Bu durum ancak işlem sıcaklığı ve süresinin artmasıyla mümkündür. İşlem sıcaklığının Fe-B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığın (1149 ^oC) altında olması gerekir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda bölgesel erimeler meydana gelerek malzeme yüzeyini bozabilir [11]. Şekil 1.2'de Ck 45 çeliği ve Ekabor-1 borlayıcısı kullanılarak yapılan çalışmada tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklıkla değişimi görülmektedir.

Borlama sonucunda yüzeyde oluşan bor tabakası diş formunda oluşmaktadır. Oluşan bu tabaka yüzeyin kimyasal yapısının sıcaklığın etkisi ile değişmesi sonucu meydana gelmektedir. Yüzeyde FeB ve Fe_2B kimyasal yapısına sahip dişli tabaka oluşmaktadır. Bazen FeB bazen Fe_2B, bazen de her iki tabaka birlikte oluşur. FeB fazı Fe_2B fazından daha sert ve daha gevrektir.

Tabaka kalınlığını sınırlayan bir diğer faktör de kırılganlıktır. Tabaka kalınlığı arttıkça kırılganlığı da artacağı için özellikle çift fazlı tabakalarda kalınlığın fazla olmaması gerekmektedir [16].

Çeliklerdeki alaşım elementi ve karbon miktarının artması ile bor difüzyonu azalmaktadır. Bunun sonucu olarak borür tabakasının hem kalınlığı azalmakta, hem de diş şeklindeki yapısı düzleşmektedir [11].

Çelik esaslı malzemeler için kullanım şartlarına göre 20-200µm tabaka kalınlığı uygundur. Kırılganlık yönünden alaşımlı çeliklerde 100µm, alaşımsız çeliklerde 200µm kalınlığa, hatta darbesiz aşınmaya maruz parçalarda su vermemek kaydıyla 400µm kalınlığa çıkılabilmektedir. Borlama sıcaklığının artması tabaka kalınlığını arttırmasına ilaveten poroziteyi de arttırarak tabakanın gevrekliğine yol açar [17].



Şekil 1.2 : Ck 45 çeliğinin tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklıkla değişimi [18].

1.2.3.2 Sertlik

Borlu tabakanın özelliklerine ait çalışmalar daha çok sertlik, aşınma ve korozyon özellikleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Borlamanın en büyük etkisi sertlik üzerine olup, ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak FeB ve Fe_2B fazlarına bağlıdır. FeB fazı, Fe_2B fazından daha sert ve gevrektir. Borlama ile elde edilen sertlik; karbon çeliklerinde 1800-2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2500-2800 HV, titanyumda ise 3000 HV civarındadır [19].

Sertlik bakımından borlu tabakanın en önemli bir başka özelliği de daha sonraki ısıl işlemlerde bu sertliğini korumasıdır. Borlu tabakanın 900 $C^{0,}$ a kadar sertliğini koruması, matris malzemesine yapılacak ısıl işlemler için geniş bir sıcaklık aralığına izin verir. Borlama işlemi sonunda oluşan tabakaların özellikleri ana malzeme içindeki alaşım elementlerine bağlı olarak değişmektedir. Çizelge 1.4'te farklı malzemelerle oluşturulabilecek bor tabakalarının özelikleri verilmiştir.

Çizelge 1.4 : Farklı malzeme bor tabaka sertlikleri ve erime noktaları [20].

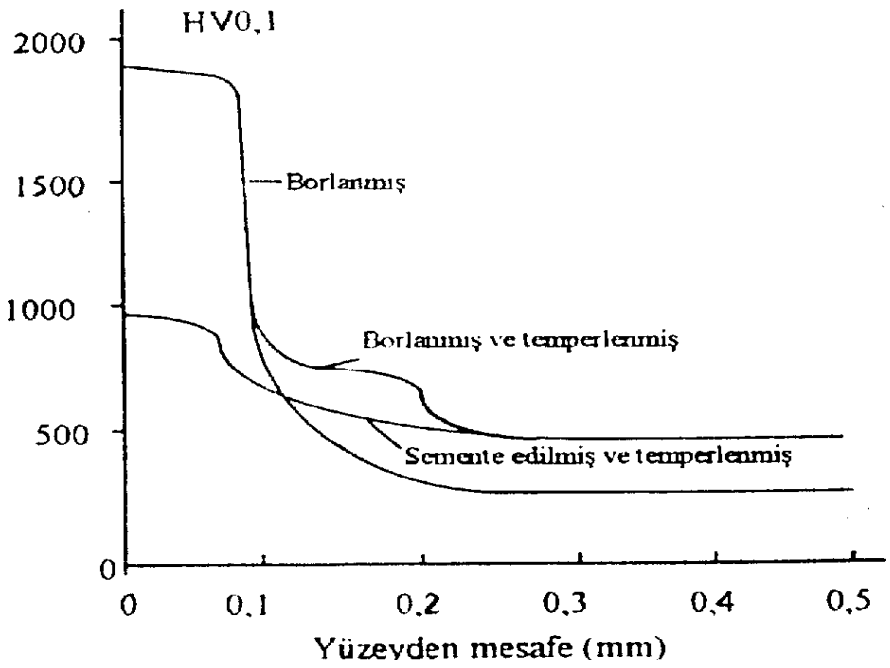
Malzeme	**Oluşan Bileşik**	**Sertlik (HV veya kgf/mm^2)**	**Ergime Noktası (^{o}C)**
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe_2B	1800-2000	1390
Co	CoB	1850	1390
	Co_2B	1500-1600	1390
	Co_3B	700-800	1390
Ni	Ni_4B_3	1600	1390
	Ni_2B	1500	1390
	Ni_3B	900	1390
Mo	Mo_2B	1660	2000
	MoB_2	2330	≈2100
	Mo_2B_4	2400-2700	2100
W	W_2B_5	2600	2300
Ti	TiB	2500	≈1900
	TiB_2	3370	2980
Zr	ZrB_2	2250	3040

Borlanmış çelikler ile diğer yöntemlerle sertleştirilmiş malzemelerin sertlik karşılaştırılmaları Çizelge 1.5'de görülmektedir.

Çizelge 1.5 : Borlama ile diğer yüzey sertleştirme işlemleri sertlik değerleri [20].

Malzeme	**Mikrosertlik (HV veya kgf/mm^2)**
Borlanmış Yumuşak Çelik	1600
Borlanmış AISI H13 Kalıp Çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 Çeliği	1900
Su verilmiş Çelik	900
Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş H13 Kalıp Çeliği	540-600
Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş A2 Kalıp Çeliği	630-700
Yüksek Hız Çeliği (HSS) BM42	900-910
Nitrürlenmiş Çelik	650-1700
Karbürlenmiş Düşük Alaşım Çeliği	650-950
Sert Krom Kaplama	1000-1200
Sinterlenmiş Karbürler, WC+Co	1160-1820
Al_2O_3+ZrO_2 Seramik	1483
Al_2O_3+TiC+ZrO_2 Seramik	1738
Sialon Seramik	1569
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B_4C	5000
Elmas	>10000

Çizelge 1.5 incelendiğinde, borlanmış çeliklerde elde edilen yüzey sertilkleri, diğer yöntemlerle kıyaslandığında oldukça yüksek yüzey sertliği değerleri elde edildiği görülmektedir. Şekil 1.3'de borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımları görülmektedir.



Şekil 1.3 : Borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımları [18].

Sertlik ölçümleri mikrosertlik yöntemi ile vickers veya knoop uçları kullanılarak yapılır [18]. Ölçümlerde büyük yüklerin kullanılması çatlama ve dökülme gibi nedenlerden dolayı hatalı sonuçlara neden olur. Ayrıca büyük yükler tabakanın bozulmasına ve tabakanın altındaki bölgenin deformasyonuna neden olabilir. Genel olarak 50-100 gr.'lık yüklerle ölçüm yapılır.

1.2.3.3 Aşınma

Sürtünme katsayısı ve aşınma dayanımı bir sistem özelliği olmakla beraber, genellikle yüksek aşınma direnci için malzemenin daha sert ve sürtünme katsayısının mümkün olduğu kadar düşük olması istenir. Borlama ile bu özellikler büyük ölçüde sağlanır (Çizelge 1.6).

Çizelge 1.6 : Bazı malzemelerin sürtünme katsayılarının karşılaştırılması [11].

	SÜRTÜNME KATSAYISI	
MALZEME	**BORLANMIŞ**	**BORLANMAMIŞ**
Düşük karbonlu çelik	0.17 - 0.19	0.585 - 0.595
Takım çeliği	0.07 - 0.04	0.16 - 0.18

Darbesiz yüklemenin söz konusu olduğu derin çekme kalıpları, dişli çarklar, tekstil makinelerinde kullanılan yönlendirme tamburları, abraziv aşınmaya maruz kalan çuval doldurma nozulları, plastik enjeksiyon makinelerinin helezonları gibi makine

parçalarında borlanmış yüzeylerin diğer işlemlerle elde edilenden çok yüksek aşınma direncine sahip oldukları belirlenmiştir. Ancak bu yöntem, özellikle doğru tribolojik sistem seçimleri yapılmadığı takdirde veya seçilen sistemde beklenen fonksiyona uygun borlama işlemi ve/veya uygun ek ısıl işlemler yapılmadığı durumda sementasyon ve nitrürasyon işlemlerinden daha kötü sonuçlar verebilir [11].

Paslanmaz çelik için derin çekme kalıbı 60 HRC sertlik ve yüzeyi 0.005 - 0.008 mm sert kromla kaplı AISI A6 çeliğinden yapıldığında tahrip olmadan 2000 parça, aynı çelik yüzeyi borlandığı zaman ise 5000 parça ürettiği belirtilmektedir. Başka araştırmacılar düşük karbonlu çeliklerin derin çekme işleminde kullanılan borlanmış kalıpların ömürlerinin, borlanmamış kalıplardan 85 defa daha fazla olduğunu ileri sürmüşlerdir [11].

1.2.3.4 Artık gerilmeler

Metallerde borlama işlemi sonrası borür tabakasında ve borür tabakası – ana metal arasında artık gerilmeler oluşur. Malzemenin kimyasal bileşimi, borlama şartları ve uygulanan ısıl işlemler artık gerilmelere etki eden faktörlerdir. Tabakanın faz yapısı (Tek fazlı veya çift fazlı) ve geometrisi de (düz veya girintili çıkıntılı) artık gerilmelerin oluşumuna etki eder [11]. İdeal bir tabaka için tek fazlı ve tabaka geometrisinin diş formunda olması istenir.

Artık gerilmeler, FeB, Fe_2B ve ana malzemenin ısıl genleşme katsayılarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 1.7'de borür tabakası ve saf demire ait ısıl genleşme katsayıları verilmektedir.

Çizelge 1.7 : Borür tabakası ve saf demire ait ısıl genleşme katsayıları [21].

Malzeme	**Isıl Genleşme Katsayısı**
Saf Demir	15.6×10^{-6} $^{o}C^{-1}$
FeB	23×10^{-6} $^{o}C^{-1}$
Fe_2B	7.85×10^{-6} $^{o}C^{-1}$

Çift fazlı borür tabakalarında borlama sonrası Fe_2B'de basma, FeB'de artık çekme gerilmeleri oluşur. Bu gerilmeler, tabakanın çatlamasına ve FeB fazının pullanarak dökülmesine neden olur.

Borlamadan sonraki uygulanan ısıl işlemler de artık gerilmelere etki etmektedir. Soğuma hızı arttıkça artık gerilmeler azalmakta ve en yüksek artık gerilmeler borlamadan sonra fırında soğutma şartlarında gerçekleşmektedir [22].

1.2.3.5 Korozyon direnci

Borür tabakasının suya ve atmosfere karşı korozyon direncinin düşük olmasına karşılık, bazı asitlere ve sıvı metallere karşı iyi bir direnç gösterir. Özellikle HCl, H_2SO_4 ve H_3PO_4 gibi asitlerle aluminyum, kurşun ve çinko gibi metallerin sıvı banyolarında borlu malzemelerin korozyon direnci çok yüksektir [18]. Yüksek kromlu çeliklerde borlama ile koruyucu krom oksit yerine daha az koruyucu olan krom borür meydana gelir. Bu bakımdan yüksek alaşımlı malzemelerin borlanmasıyla daha iyi korozyon özelliği her zaman elde edilmeyebilir [11].

1.2.4 Borlanabilen malzemeler

Bütün demir-karbon esaslı malzemeler, örneğin yapı çelikleri, sementasyon çelikleri, ıslah çelikleri, takım çelikleri, çelik döküm, gri dökme demir dışında gerek toz, gerekse diğer yöntemlerle üretilen bütün ferro alaşımlara uygulanabilmektedir. Refrakter metaller (W, Ta, Mo, Zr, Hf, Nb), karbürler (özellikle Co ile bağlı WC) ve Ni esaslı alaşımlara başarılı bir şekilde uygulanarak özel yapıda borlu tabakalar elde edilebilmektedir. Ti ve Ti esaslı alaşımlara bor yayınımı ile aşınmaya dayanıklı TiB_2 tabakası elde edilebilmektedir [23]. Titanyum ve titanyum alaşımlarının borlanması 1000-1200 ^oC arasındaki sıcaklıklarda yapılmalıdır. Titanyum ve rafrakter metaller üzerinde oluşan borür tabakasının sertlik değeri nikel ve kobalt üzerinde oluşan tabakaya göre çok yüksektir [20].

Borlama yeni geliştirilen yöntemlerle Cu ve alaşımlarına da uygulanabilmektedir. Fakat düşük ergime sıcaklığına sahip Zn ve Al'a uygulanamamaktadır [11].

Genel olarak Borlama işleminin avantajlarını aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür [20]:

- Özellikle nitrürleme ile karşılaştırıldığında borlanmış tabakaların sertliği yüksek sıcaklılarda da korunmaktadır,
- Bu yöntemle çok geniş bir aralıktaki çelikler borlanabilmektedir,
- Borlanmış yüzeyler 850^oC'ye kadar oksitlenme direncine sahiptir,

- Borlanmış malzemeler, oksitlenme ve korozyon ortamı altında yüksek yorulma dayanımı ve servis ömrüne sahiptir.

Borlamanın dezavantajları ise [20]:

- Gaz karbürleme ve plazma nitrürleme işlemi ile kıyas edildiğinde, esnek olmaması ve yoğun işçilik gerektirmesi bu yöntemin daha pahalı olduğunu ortaya çıkarmaktadır,

- Borlama sonucu oluşan hacimsel büyüme, tabaka kalınlığının yüzde 5 ila 25'i arasında değişmektedir. Örneğin 25 μm kalınlığındaki bir tabakada 1.25 ila 6.25 μm kalınlığında büyüme oluşmaktadır. Bu büyümenin değeri temel malzeme kompozisyonuna bağlıdır ve belirli bir malzeme kombinasyonu ve yüzey sertleştirme prosesi için sabit kalmaktadır.

- Borlanmış malzeme yüzeyinden hassas işleme gerektiğinde, bu sadece elmas lepleme ile yapılabilmekte, çünkü konvansiyonel taşlama yöntemleri borlanmış tabakaların çatlamasına yol açabilmektedir,

- Çoğu çeliğin borlanmasında korozyon-yorulma dayanımında artma gözlenmesine rağmen, eğilme-yorulma dayanımında çok az bir yükselme sağlanmaktadır,

- Genel olarak, borlanmış çelik alaşımlarının karbürlenmiş ve nitrürlenmiş çeliklere göre dönmeye çalışan ve noktasal yorulmaya çalışan parçaların dayanımlarının düşük olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple dişlilerin ve vidaların borlanması oldukça sınırlıdır.

- Çoğunlukla borlamadan sonra borlanmış tabakaların bütünlüğünü korumak için takımları temperlemek ve sertleştirmek gerekebilmektedir.

1.2.5 Borlama ile ilgili diğer çalışmalar

Yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirmek suretiyle yapılan yüzey sertleştirme işlemleri, katı, sıvı veya gaz fazında bulunan elementlerin yüksek sıcaklıkta malzeme yüzeyine yayındırılması esasına dayanır. Budisnski [24], yayınma işlemlerini değişik açılardan karşılaştırmıştır. Borlama işlemi sonucunda, nitrürleme ve karbürleme gibi klasik yayınma işlemlerine göre oldukça yüksek yüzey sertliği elde edilmektedir. Ancak borlama işlemi, nitrürlemeye göre oldukça yüksek bir sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir.

Batı Avrupa'da, özellikle Almanya'da katı ortamda borlama işlemi tercih edilmekte ve yaygın olarak kullanılmakta iken, Doğu Avrupa ülkelerinde, özellikle de Rusya'da sıvı ortamda borlama uygulanmaktadır. Gaz reaktif ortamda borlama ile ilgili Hegewaldt ve diğ. [25], alaşımsız çelikleri 650 ^{o}C de gaz ortamda borladıklarını ve olumlu sonuç aldıklarını bildirmektedirler.

Bindal [26], borlama süresi ve krom miktarına bağlı olarak, krom borürler tesbit etmiştir ve kromun çok fazla olmasa bile, kırılma tokluğunu düşürdüğünü belirlemiştir.

Eyre [27], karbürleme ve borlama işlemi uygulanmış malzemelerin aşınma davranışlarını karşılaştırmış ve borlamanın karbürlemeye göre özellikle geçiş bölgesi üzerindeki yüklemelerde adhezif aşınma dayanımı açısından çok daha iyi sonuçlar verdiğini ve bu özelliği yüksek sıcaklıklarda dahi muhafaza ettiğini belirlemiştir.

Hunger ve diğ. [28], değişik sıcaklıklarda yaptığı aşınma testleri sonucunda , borlanmış yüeylerin özellikle yüksek sıcaklıklarda, karbürlenmiş ve nitrürlenmiş yüzeylerden çok daha iyi aşınma dayanımı gösterdiğini belirlemiştir.

Genel ve diğ. [29] AISI W1 çeliğini 1-8 saat aralığında Ekabor-I bileşikleri kullanarak borlama işlemine tabi tutumuşlar ve yüzey sertliklerini ölçmüşlerdir. Sonuç olarak borlanmamış çeliklerde yüzey sertliği 260 HV olmasına karşılık borlanmış AISI W1 çeliğinde 1690-1800 HV olduğu görülmüştür. Ayrıca bor tabakasının sertliği 950 ^{o}C'ye kadar borlama sıcaklığına bağlı olarak azalan oranda artmaktadır. Bu sıcaklığın proses zamanı 6 saati geçmediği durumda optimum sıcaklık olduğu da belirlenmiştir. Ayrıca tabaka kalınlığını proses zamanı ve sıcaklığına bağlı olarak belirlemek üzere bir ampirik formül elde edilmiştir.

M.Kulka ve A. Pertek [30] krom ve nikel esaslı düşük karbonlu çeliklerde borlama yapmış ve karbon miktarının aşınma dayanımına etkilerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda karbon miktarı, %1.2 den düşük çeliklerde aşınma dayanımının en yüksek seviyeye geldiğini görmüşlerdir.

K. Genel ve diğ. [31], borlama yapılmış AISI W1 çeliğinin bor tabakası, sertlik ve borlama prosesi parametrelerinin yapay sinir ağları ile tahmin edilebilirliğini incelemişler ve %95 oranında doğru sonuçlar elde etmişlerdir.

K.S. Nam ve diğ. [32], düşük karbonlu çeliklerde plazma borlamanın etkilerini incelemişler ve borlanmış tabaka oluşum hızının ve sertliğin klasik borlamaya göre daha düşük olduğunu belirlemişlerdir.

P.J. Wilbur ve diğ. [33], iyon borlanmış demir disklerin karakteristiklerini incelemiş ve 900 ^{o}C de oluşan α-Fe matrisindeki Fe_2B bileşiklerinin aşınmaya en dayanıklı yüzeyleri oluşturduğunu belirlemişlerdir.

P.X. Yan ve diğ. [34], C45 çeliğine borlama ve N^+ iyon implentasyonu uygulamışlardır. Bu işlem sonucunda bor tabakasının kırılganlığının azaltılabileceği ve özelliklerinin arttırılabileceği görülmüştür.

L.G. Yu ve diğ. [35], yumuşak çelikleri plazma sinterleme tekniği ile 700-1000 ^{o}C aralığında 30 dk. İle borlamışlardır. Mikroyapı analizi sonucunda 700 ^{o}C'de yapılan borlamada 2-5 μm bor tabakası kalınlığı oluştuğu görülmüştür. Bu tabakanın genel olarak Fe_2B bileşiğinden oluştuğu görülmüştür.

Ferrobor alaşımlarının üstün manyetik özelliklerinin bulunması, bu alaşımların elektrik sektöründe büyük kullanım alanı bulmasına neden olmuştur. Özellikle %3 B, %5 Si içeren demir esaslı alaşımların, amorf metal (metalik cam) olarak sac haline getirilerek trafolarda kullanılabilmesi, konvensiyonel tane yönlenmiş silisyumlu saclara göre 1/3 oranında çekirdek kayıplarını azaltmıştır [36].

Alaşımlı çeliklerdeki borlu tabaka, kafesteki Fe atomunun yerini alan alaşım elementlerini de içerebilmektedir [37]. Bu tür çelikler FeB ve Fe_2B bileşiklerinin yanında, alaşım elementlerine bağlı olarak Cr_2B, CoB, CoB_2, TiB_2, NiB_2 ve kafes parametresi 10.62±0.02 A^{o} olan kübik yapılı $M_{23}(B,C)_6$ (M=Metal) bileşiklerini de içerirler. Bor aynı zamanda çelik içerisinde bulunan V_4C_3, NbC gibi karbürlerle de eriyik halde bulunabilir. Ni ve Cr, Fe_2B' de Fe atomlarının yerini alarak erir [37].

W. Muhammad ve diğ. [38], INCONEL 722 Süperalaşımını katı borlama ile borlamışlar ve bor tabakası kalınlığı ile ısıl işlem uygulanmış ve ek olarak yaşlandırılmış INCONEL 722 süperalaşımının yüzey sertliğini ve aşınma dayanımlarını araştırmışlardır. 20x4x4 mm boyutlarındaki numune, öncelikle 1035 ^{o}C'de 30 dakika ısıl işleme tabi tutulmuş ve ardından havada soğutulmuştur. Bir diğer numune de bu ısıl işleme ek olarak 730 ^{o}C'de 18 saat yaşlandırılmış ve havada soğutulmuştur. Isıl işlem sonunda elde edilen yüzey sertliği 189 HV, ısıl işleme ek olarak yaşlandırma sonucunda elde edilen yüzey sertliği ise 331 HV olarak

bulunmuştur. Bu ölçümler 10 saniye süresince 200 g yük uygulanmak suretiyle elde edilmiştir. Bu numunelere daha sonra argon atmosferinde, 900 ^{o}C'de 10 saat süresince %50 B_4C, %45 SiC ve %5 KBF_4'ten oluşan karışım ile katı borlama uygulanmıştır. Bu işlemler sonucunda sadece ısıl işlem uygulanmış numune için bor tabakası kalınlığı 51 μm, ısıl işlem ve yaşlandırma uygulanmış numune için bor tabakası kalınlığı 57 μm olarak ölçülmüştür. Yüzey sertliği değerleri için ise ısıl işlem uygulanmış numunede 189 HV sertliği 1187 HV'ye ve ısıl işleme ek olarak yaşlandırma uygulanan numunede ise 331 HV'den 1097 HV'ye çıktığı görülmüştür. Sonuç olarak, sadece ısıl işlem görmüş numunelerde yüzey sertliğinin ısıl işlem ve yaşlandırma yapılmış numunelere göre daha fazla olduğu, ayrıca ısıl işlem ve yaşlandırma yapılmış numunelerde yüzey tabakası kalınlığının daha fazla olduğu ve sadece ısıl işlem yapılmış numunelerin aşınma dayanımlarının ısıl işlem ve yaşlandırma yapılmış numunelere göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Andrej Salak ve diğ. [39], toz metalurjisi malzemeleri sinter borlama ile ilgili yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Böylece manganez temelli bor aktivatörler kullanarak toz metalurjisi malzemeleri eş zamanlı olarak sinterlemiş ve borlamışlardır. Karbon çeliği ile Ni-Mo ve Ni-Cu-Mo alaşımlı çelik parçalar hazırlanarak borlama tozları (ana element olarak demir boron (ferroboron), aktivatör olarak demir manganez (ferromanganez) ve alüminyum-oksit) ile birlikte 650^{o}C'de ve ardından 1120 ^{o}C'de 1 saat süreyle sinterlenmişlerdir. Bu işlem sonunda borlanmış çeliklerin 40 ila 180 μm kalınlık ve 1110 ila 1370 HV sertliğinde bor tabakalarına sahip olduğu görülmüştür.

W.D. Man ve diğ. [40], kobalt eklenmiş tungsten karbür (WC-Co) malzemelere CVD yöntemiyle elmas kaplama işlemine bir ön hazırlık işlemi olarak H_2-CH_4 gaz karışımını Mikrodalga CVD kullanarak H_2-NH_3-B_2O_3 plazma oluşturmuşlar ve boro-nitrürleme işlemi uygulamışlardır. Bu işlem sonucunda; 800 ^{o}C'de 2 saatlik plazma boro-nitrürleme ile WC-Co malzemede elmas film elde edilmiştir. Bu elmas filmin kalitesinin diğer konvansiyonel yöntemlerle elde edilenlerden daha iyi olduğu görülmüştür. Sinterlenmiş karbürün, H_2-B_2O_3 ortamına NH_3 ilave edilmesiyle, plazma tarafından oluşturulan olumsuz etkiden korunduğu görülmüştür. Plazma boro-nitrürleme, kobaltın malzeme yüzeyindeki aktivasyonunu pasifize ettiği, böylece kobaltın malzeme içinde karbon grafitlerinin oluşmasını sağlayan etkisini azalttığı görülmüştür.

P. Gopalakrishnan ve diğ. [41], orta karbonlu çelikleri sürekli ve aralıklı olarak borlamışlar, sonuçları karşılaştırmışlardır. Deney numunesi olarak %0.45 C, %0.2 Si, %0.7 Mn, %0.05 S ve %0.05 P'dan oluşan orta karbonlu çelik kullanılmıştır. Borlama yöntemi olarak da katı ve elektroliz yöntemiyle borlama yöntemleri kullanılmıştır. Numuneler 950 ^{o}C'de 4 saat süreyle sürekli olarak katı ve elektroliz borlama yöntemiyle borlanmışlar ve daha sonra havada soğutulmuşlardır. Aralıklı borlamada ise, numuneler 1 saat süreyle 950 ^{o}C'de borlanmışlar, daha sonra 600 ^{o}C'ye kadar havada soğutulmuşlar ve tekrar 1'er saatlik sürelerle borlanmışlardır. Bu işlem dört defa katı ve elektroliz ile borlama yöntemi için tekrarlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda; aralıklı borlama ile mikroyapı morfolojisinde, artık gerilme dağılımında, tokluk ve kırılganlık gibi mekanik özelliklerde daha iyi sonuçlar vermiş, yüzey sertliği ise sürekli borlamaya göre daha düşük çıkmıştır. Bu çalışma sonucunda; ferroboron ve ferrosilikon gibi düşük maliyetli malzemeler kullanılarak bir maliyet-etkin borlama yöntemi geliştirilmiş, yüksek mikroyapı, mekanik özellikler ve korozyon dayanımlı yüzey oluşturan aralıklı borlama yöntemi geliştirilmiş, aralıklı borlama ile sürekli borlamaya göre bor tabakası içerisinde daha az çatlaklar oluştuğu gözlenmiş ve böylece aralıklı borlama ile kırılganlığın azaltılabileceği belirlenmiş ve aralık borlama ile yüksek korozyon direnci oluşturulabileceği belirlenmiştir.

C.L. Ge ve R.C. Ye [42], kendi kendine yayınan ötektik borlama üzerine araştırmalar yapmışlardır. Çalışmalarında C45, 40 Cr ve T10 çeliklerini, borlama için de boron-karbür (B_4C) kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda, ötektik veya hipoötektik yapıya sahip bor tabakalarının malzeme yüzeyinde kendi kendine yayınma sonucunda oluştuğu gözlenmiştir. Bor tabakasında bazı Fe_2B ve $Fe_{23}(C,B)_6$ fazlarına ek olarak genelde α-Fe ve $Fe_3(C,B)$ fazlarının oluştuğu gözlenmiştir.

N. Uzunov ve R. Ivanov [43], karbon ve alaşım çeliklerine değişik bor bileşimi toz karışımlarıyla 887 ^{o}C'de 6 saat süreyle borlama yapmışlar ve tabaka kalınlığı ile yüzeyde oluşan sertliklerin incelemesini yapmışlardır. Sonuç olarak, bor atomlarının çelik yüzeyine difüzyonu boronflorit ve BF_3 bileşiğinin yardımıyla oluştuğu, bor tabakasına ait tabaka kalınlığı, sertlik, faz kompozisyonu, yüzey temizliği gibi özellikler dikkate alındığında bor oluşturucu aktivatör olarak en iyi kombinasyonun $(NH_4)_2O$-$4BF_3$ karşımının olduğu, bu karışımın düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler için uygun olduğu görülmüştür.

L.Lin ve K. Han [44], çelikleri alev spreyle kaplama yapmış ardında da borlama yaparak mekanik özelliklerdeki değişimi incelemişlerdir. Sertlik açısından incelendiğinde Fe esaslı kaplamanın Ni esaslı kaplamaya göre daha yüksek sertliğe ulaştığı görülmüştür. Co esaslı kaplamanın ardından yapılan borlama ile diğer bütün kaplamalara nazaran en yüksek sertlik elde edilmiştir. A3 çeliğinin Fe esaslı toz ile kaplanmasının ardından yapılan borlama sonrasındaki aşınma, C1045 çeliğindeki aşınmadan daha yüksek bulunmuştur. Bunun yanında A3 çeliğinde kaplama ve borlama yaptıktan sonra normalde düşük olan korozyon dayanımının mükemmel seviyeye çıktığı görülmüştür.

K. Bartsch ve A.Leonhardt [45], doğru akım kaynağı ile BCl_3,H_2 ve Ar gaz karışımları kullanılarak 833 K den düşük sıcaklıklarda Armco iron, Ck45 (AISI 1045) ve 42CrMo4 (AISI4140) çeliklerine plazma borlama yapmışlardır. Precursor olarak $FeCl_3$ ve $Fe(CO)_5$ kullanılmıştır. Sadece $Fe(CO)_5$ kullanıldığı durumda HV0.02 mikrosertliği 1500-2000 olan birkaç mikrometer derinliğinde bor tabakaları oluşmuştur. Tabakalardaki karbon oluşumu proses basıncı ile kontrol edilmiştir. 2000 HV0.02 nin üzerindeki sertlikler tabakalardaki düşük karbon miktarı ile elde edilmiştir. 823-833 K aralığında 4W7cm^2 güç yoğunluğunda ve 1.7mbar (1.29 mmHg) basınçta deney yapılmış ve FeB ve Fe_2B tabakaları oluşmuştur. Gaz karışım oranları: H_2 (ml/dk)=450-1075, Ar (ml/dk)=208-417, BCl_3 (ml/dk)=2.5,5.0,20 olarak uygulanmıştır.

Kee-Seok Nam ve diğ. [46], tek kademeli plazma borlama prosesinde oluşan boşluk yoğunluğunu azaltmak amacıyla AISI 1045 çeliğine iki kademeli plazma destekli borlama prosesi uygulamış ve etkinliği incelemişlerdir. Numuneler 650 ^oC de 1 saat ve ardından 800 ^oC de 7 saat plazma borlanmışlardır. Borlama işlemi 266 Pa basınç altında %1.5 BCl_3, %50 H_2 ve kalanı da Ar gazlarından oluşan bir karışım atmosferinde yapılmıştır. Bu yöntemle bor tabakaları kolon yapıdan dişe benzer yapıya dönüşmüş ve çelik içindeki boşlukların klasik yöntemle yapılan borlamaya göre tamamen elimine edildiği görülmüştür. Proses basıncı 266-665 Pa aralığında oluşmuştur. Sisteme BCl_3 gazı göndermeden önce 30 dakika süre ile 500 V gerilimde Ar+H_2 karışımı ile sputtering yapılarak numuneler temizlenmiştir. BCl_3 karışım oranı %1.5-%3 aralığında değişmiş ve H_2 oranı da %50 olmuştur. Numuneler 650 ^oC ye kadar ek ısıtıcı ile ısıtılmış, 800 ^oC ye kadar da glow discharge ile çıkılmıştır. Elektrik gücü 0.5-2 W/cm^2 aralığında değişmiş ve 50 mikrosaniye ve 5-9 kHz

oranında pulse uygulanmıştır. Borlamadan sonra numuneler havada soğutulmuştur. Borlama işlemi sonucunda 55 mikrometre kalınlığında FeB ve Fe_2B tabakalarının oluştuğu görülmüştür. Bu yöntemle, tek kademeli borlamada yaklaşık %25 olan boşluk miktarı hemen hemen yok edilmiştir.

H.-J. Hunger ve G. Löbig [47], Ar, H_2 ve BF_3 atmosferi ile çelik ve nikel alaşımına plazma borlama yapmışlardır. Termokimyasal hesaplamalar, bu proseste plazma ile oluşturulan atomik hidrojenin temel rolünü göstermiştir. Ayrıca BF_3 kullanımının, BCl_3 kullanımında ortaya çıkan korozyonu önlediği de anlaşılmıştır. BF_3 (%98 den büyük safiyette), Ar (%99.998 safiyette) ve H_2 (%99.99 safiyette) karışımı ile 1000 ^oC de 400-600 V aralığında doğru akım güç kaynağı kullanılarak borlama yapılmıştır. BF_3 oranı %0.5 ile %20 aralığında, Ar %0 ila %98 aralığında ve H_2 %0 ila %85 aralığında değiştirilerek ve 8-12 mbar (6-9 mmHg) basınçta, 40 kHz pulse tekrarlama frekansında, 560 V d.c. gerilimde ve 1 lt/dk debi ile borlama yapılmıştır. C15, 100Cr6 ve Hastelloy C4 numune olarak kullanılmıştır. 750 ^oC veya 800 ^oC de 210 dk. ile %15 BF_3, %50 H_2 ve %35 Ar kullanılarak borlama yapılmıştır. C15 de 16 mikrometre kalınlıkta FeB ve Fe_2B fazları, 100Cr6 da 20 mikrometre kalınlıkta yine FeB ve Fe_2B fazları elde edilmiştir. Hastelloy C4 de ise 750 ^oC de 11 mikrometre, 800 ^oC de 28 mikrometre tabaka kalınlığı elde edilmiştir.

Hans-Jorg Hunger ve diğ. [48] yaptıkları çalışmada, değişik malzemeleri %1 ila %35 oranında BF_3, %20-%90 H_2 ve Ar ve/veya azot karışımı 0.5 ila 2 lt/dk debi olacak şekilde, 850 ^oC- 950 ^oC de 30-240 dakika süre ile, 1-10 mbar basınçta borlayarak aşınmaya dayanıklı tabakalar elde etmeyi amaçlamışlardır. Ar/veya azot gazlarının plazma oluşumu ile sıcaklık artımını sağladığı ve bor transferi aktivitesinin kontrolünü sağladığını belirtmişlerdir. Borlama sonrasında oluşan FeB bileşiklerini Fe_2B bileşiklerine dönüştürmek için borlama sıcaklığında bor gazını keserek FeB miktarına bağlı olarak 20-60 dakika daha beklemek gerektiğini belirlemişlerdir. 100Cr6 çeliğinin borlama işlemini 4kHz frekansta, 10 mbar basınçta DC ark (glow discharge) ile ısıtarak yapmışlardır. Isıtma ve soğutma Argon ve Hidrojen gazlarının 1:1 karışımı ile yapılmıştır. 850 ^oC ye ulaşıldıktan sonra %15 BF_3, %40 Ar ve %45 H_2 ve toplam debi 1 lt/dk olacak şekilde 200 dk süre ile gaz karışımı sisteme verilmiş ve borlama sonucunda 42 mikrometre kalınlığında 1800 HV0.05 mikrosertlikte FeB içermeyen bor tabakaları elde edilmiştir. Hastelloy B numunesinin borlanması ise 4kHz frekansta, 10 mbar basınçta DC glow discharge ile yapılmıştır. Isıtma ve

soğutma yine Argon ve Hidrojen gazlarının 1:1 karışımı ile yapılmıştır. Proses sıcaklığı 850 ^{o}C ye ulaşıldıktan sonra %10 BF_3, %45 Ar ve %45 H_2 ve toplam debi 1 lt/dk olacak şekilde 240 dk süre ile gaz karışımı sisteme verilmiş ve borlama sonucunda 50 mikrometre kalınlığında 2400 $HV_{0.05}$ mikrosertlikte bor tabakaları elde edilmiştir.

Emilio Rodriguez Cabeo ve diğ. [49], %2 ila %10 oranında BF_3 (iyi sonuç %7.5), %0 ila %20 Ar, ve kalan miktar da H_2 olacak şekilde 1 ila 10 kPa basınçta 800 ^{o}C de 650 Volt gerilim, 4.762 kHz frekans ve 210 mikrosaniyelik pulse peryodu uygulayarak plazma borlama yapmışlardır. Tabaka kalınlığının sıcaklığın arttırılmasıyla arttırılabileceği gösterilmiştir.

Yu J., ve Matsumoto S. [50], kobalt içeren tungsten karbür (Co-WC) numunelere Ar-N_2-BF3-H_2 atmosferinde kübik boron nitrür (cBN) elde etmek amacıyla dc jet plasma chemical vapor deposition uygulamışlardır. 1050 ^{o}C'de kübik boron nitrür (cBN) tabakaları elde edilmiştir. 1090 ^{o}C'de ise kübik boron nitrür (cBN) tabakaları elde edilememiştir. 960 ^{o}C'de elde edilen kübik boron nitrür (cBN) tabakalarının, 1050 ^{o}C'de elde edilen kübik boron nitrür (cBN) tabakalarından daha iyi olduğu görülmüştür.

M. Usta ve diğ. [51], saf tugsteni katı yöntemle borlamışlar ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Borlama işlemi Ekabor ile 940 ^{o}C'de 2, 4 ve 8 saat süre ile yapılmış ve borlama süresine bağlı olarak 10-42 μm kalınlığında uniform ve sadece WB bileşiğinden oluşan bor tabakası elde edilmiştir. Borlama sonucunda; WB'den oluşan yüzey tabakası, bor ile katı çözeltiden oluşan geçiş bölgesi ve ana malzemeden oluşan üç bölgenin meydana geldiği görülmüştür. Borlanmış malzemenin yüzey sertliği 445 HV'den 2500 HV'ye çıktığı görülmüştür.

K.G. Anthymidis ve diğ. [52], TiAlV alaşımını 1000 ^{o}C'de akışkan yatak reaktörde borlamışlardır. Akışkan gaz olarak Ar, akışkan ortamı olarak ise B_4C ve katı halojenden oluşmuştur. 3 saat borlama sonucunda 3μm kalınlığında ve 6 saat borlama sonucunda da 10μm kalınlığında kısmi diş yapısında TiB ve TiB_2'den oluşan bor tabakaları elde etmişlerdir.

K.A. Khor ve diğ. [53], tugsten numuneler üzerinde katı borlama yöntemine spark plasma sinterleme desteği yaparak bor tabakaları oluşturmuşlardır. İşlem 1000-1400 ^{o}C aralığında 30 dakikalık süreyle yapılmıştır. Numunelerin mikro-analizi soncunda

WB'den oluşan bor tabakalarının 35-112 μm kalınlığında ve kolon yapıda olduğu görülmüştür. Bor tabakasının sertliğinin ise ortalama 2500 HV civarında olduğu görülmüştür. Bor tabakasının 1000 ^{o}C'de 30 dakika süreyle ısıl işlem görmesinin mikroyapısında ve mikro sertliğinde bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Winfried Grafen and Bernd Edenhofer [54], termo-kimyasal difuzyon proseslerinde oluşan yeni gelişmeleri incelemiş ve karbürleme, düşük basınçta karbürleme, düşük basınçta karbo-nitrürleme, yüksek sıcaklıkta karbürleme, nitrürleme, ferritik nitro-karbürleme, ferritik oksi-nitrokarbürleme, plasma karbürleme, plazma nitrürleme ve borlama yöntemlerini örneklerle anlatmışlardır.

Xueliang Qiao ve diğ. [55], 42CrMo4 çeliğini kesikli doğru akım plazma destekli kimyasal buhar değişimi (pulsed-DC plasma assisted chemical vapor deposition technique-Plasma CVD) yöntemi ile 830 ^{o}C'de, 800 Pa basınçta trimetilborat ($B(CH_3O)_3$), Argon (2700 ml/dk) ve Hidrojen (540 ml/dk) karışımı kullanarak 1 saat süreyle borlamışlar ve trimetilborat ($B(CH_3O)_3$)'ın akış oranının etkisini inlemişlerdir. Trimetilborat ($B(CH_3O)_3$) sisteme 0.1 g/h ila 1 g/h arasında değişen oranlarda gönderilmiştir. Borlama sonrasında borlama tabakasının diğer yöntemelre göre daha C açısından daha zengin olduğu ve bu tabakada B, Fe ve C olduğu görülmüştür. Borlanmış tabakanın kalınlığının trimetilborat ($B(CH_3O)_3$)'ın akış oranı arttıkça arttığı görülmüştür. Trimetilborat ($B(CH_3O)_3$)'ın debisi 0.8 g/h'den yüksek olduğu zaman tabaka kalınlığının artık artmadığı görülmüştür. Ayrıca, trimetilborat ($B(CH_3O)_3$)'ın debisinin 0.5 g/h'den yüksek olduğu durumlarda da B-C tabakasının oluştuğu ve debinin artmasına bağlı olarak bu tabaka kalınlığının da arttığı, böylece B iyonlarının bu tabaka yüzünden malzemeye difüzyonunun zorlaştığı ve B-C tabakasının belirli bir değere (yaklaşık 0.1 μm) ulaşmasından sonra da bor tabakasının en yüksek değerine ulaştığı (yaklaşık 0.7 μm) ve daha fazla artmadığı görülmüştür.

Sudeep Abraham ve diğ. [56], AISI 304 çeliğinde PECVD (plasma-enhanced chemical vapor deposition) yöntemini kullanarak $TiCl_4$, BCl_3, Ar, N_2 ve H_2 gaz karışımı ile Ti-B-C-N filmi oluşturmuşlardır. Oluşan bu filmin mikroyapısının ve mikrosertliğinin proses sıcaklığı ve bor içeriğine bağlı olarak değiştiği görülmüştür. 470 ^{o}C'nin üzerindeki sıcaklıklarda Ti-B-C-N filminin oluştuğu ve mikro sertliğinin 21 GPa'dan 42 GPa'a yükseldiği görülmüştür. 670 ^{o}C'nin üzerindeki sıcaklıklarda

ise filmdeki tane yapısının büyümesinden dolayı mikro sertliğin azaldığı görülmüştür.

I. Uslu ve diğ. [57], AISI P20 çeliğini Ekabor 2 ile 800, 875 ve 950 ^{o}C sıcaklıklarda 2, 4, 6, ve 8 saat sürlerle katı borlama yapmışlardır. Borlama sonucunda 1500 HV sertlikte 10-180 μm kalınlıkta bor tabakalarının oluştuğunu belirlemişlerdir. XRD analizi sonrasında FeB ve Fe_2B fazlarına ek olarak CrB ve MnB fazlarının da oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek sertlik oluşan tabakalarda kırılma tokluğunun düşük olduğunu belirlemişlerdir.

I. Uslu ve diğ. [58], AISI P20 ve AISI 1040 çeliklerini Ekabor 2 ile 800, 875 ve 950 ^{o}C sıcaklıklarda 2, 4, 6, ve 8 saat sürelerle katı borlama yapmışlar ve sonuçlarını birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Borlama sonucunda oluşan tabakanın her iki çelikte de sütunsal bir yapıya sahip olduğu ve bu tabakanın borür, geçiş bölgesi ve ana malzemeden oluşan üç bölgeye ayrıldığı görülmüştür. Bu üç bölgenin sertlik ölçümlerinde de en dıştaki borür tabakasının en yüksek sertlikte olduğu, geçiş bölgesinde sertlik değerinin azaldığı ve ana malzemede de bor tabakası olmadığından sertliğinde bir değişiklik olmadığı görülmüştür. 950 ^{o}C'de 8 saat borlama sonucunda AISI 1040 çeliğinin yüzeyindeki sertlik 1500 HV iken, AISI P20 çeliğinin yüzeyindeki sertlik ise yaklaşık 1650 HV olarak belirlenmiştir. XRD analizi sonucunda alaşımsız AISI 1040 çeliğinde FeB ve Fe_2B fazlarının oluştuğu, AISI P20 çeliğinde ise FeB ve Fe_2B fazlarına ek olarak MnB ve CrB fazlarının da meydana geldiği belirlenmiştir. Kırılma tokluğu analizinde AISI 1040 çeliğinin kırılma tokluğu değerinin 3.2 MPa $m^{1/2}$ ila 5.1 MPa $m^{1/2}$ aralığında değiştiği, P20 çeliğinin kırılma tokluğu değerinin ise 2.9 MPa $m^{1/2}$ ila 4.79 MPa $m^{1/2}$ aralığında değiştiği görülmüştür. Kinetik analiz soncunda da tabaka kalınlığı ile proses zamanı arasında parabolik bir ilişki olduğu görülmüş ve AISI 1040 için aktivasyon enerjisinin 168 kJ/mol K, AISI P20 için de 200 kJ/mol K olduğu hesaplanmıştır. Buradan da B atomlarının P20 çeliğine nüfuziyetinin 1040 çeliğine göre daha düşük olduğu, bunun sebebinin de P20 çeliğinde bulunan alaşım elementlerinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

R. Ribeiro ve diğ. [59], korozyona dayanıklı refrakter bir metal olan tantalumu, katı borlama yöntemi ile borlamışlar ve aşınma ve sürtünme karakteristiklerini incelemişlerdir. Katı borlama sonucunda bor tabakası kalınlığı 2.79 μm ila 8.97 μm kalınlığında ve 3419 HV sertliğinde oluşmuştur. Saf tantalumun sertliği ise 150 HV

olarak ölçülmüştür. Sürütnme katsayısı analizinde ise, kuru ortamda 2000 çevrimden sonra sürtünme katsayısının 0.44 olduğu görülmüştür. Çevrim sayısı arttırıldıkça sürtünme katsayısının 0.34 civarında sabit kaldığı görülmüştür. XRD analizi soncunda ise; borlama sonrasında TaB ve TaB_2 fazlarının oluştuğu görülmüştür. Kuru sürtünme testi yapılan numunelerde ise demir oksit (Fe_3O_4) oluştuğu ıslak sürtünme katsayısı testi yapılan numunelerin analizinde ise; tantalum oksit (TaO_2) ve sodyum postasyum borit (KNa_2BO_3) oluştuğu görülmüştür.

Z. Zakhariev ve diğ. [60], C45 çeliğini boron-aluminize yaparak alüminyum eriyiğinde korozyon dayanımını araştırmışlardır. Eşzamanlı borlama ve alümine yapılmasının mümkün olduğu ve 1 mm'ye kadar tabaka kalınlığının elde edildiği görülmüştür. 900 ^oC'de 8 saat süreyle yapılan testler, boron-aluminize yapılarak elde edilen tabakaların diğer yöntemelere göre daha kararlı olduğunu göstermiştir. Mikrosertlik ölçümlerinde, 12 ila 30 GPa değerleri aralığında sonuçlar elde edilmiştir. Maksimum sertlik, 22-30 GPa değerinde, iki bölgeli ZrO_2, ZrB_2 ve Fe_2B fazlarında oluştuğu belirlenmiştir. Bu yöntemle, karbon çeliklerinin aluminyum eriyiğinde korozyona karşı kullanılabileceği görülmüş ve yöntemin basit, uygun ve ekonomik olarak tavsiye edilebileceği belirtilmiştir.

Shu Qin ve Allen McTeer [61], kesikli RF- uyarıcılı diboran (B_2H_6) plazma siteminin karakterizasyonu ve optimizayonu ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında diboranı (B_2H_6), hidrojen (H_2) kullanarak seyreltmek suretiyle bor kaybının kontrol edilebileceği ve minimize edilebileceği belirtilmiştir. Hidrojen oranının %92.5-95 ve diboranın (B_2H_6) %7.5-5 aralığındaki değerlerin yüksek dozlu bor nüfuziyeti için optimum değerler olduğunu belirtmişlerdir.

C. Bindal ve A.H. Ucisik [62], %0.3 C ve %0.02 P içeren normal karbonlu çeliği 940 ^oC'de 0.5-10 saat aralığında değişik sürelerle boraks, borik asit ve demir-silikon içeren banyoda sıvı borlama yapmışlar ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Taramalı elektron mikroskobu (Scanned Electron Microscope-SEM) incelemesi sonucunda yüzeyde oluşan bor tabakasının yaklaşık 160 μm kalınlığında ve sütunsal bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Yüzeyden 10 μm kalınlığa kadar oloan bölgede FeB fazı, bundan sonraki yaklaşık 160 μm kalınlığa kadar olan bölgede de Fe_2B fazının oluştuğu görülmüştür. 52100 çeliği ile safir malzemeden yapılmış olan küresel bilyalarla yapılan sürtünme katsayısı deneyleri sonucunda başlangıçta 0.1 olan sürtünme katsayısı değeri zamanla artmakta ve yaklaşık 100 çevrimden sonra

0.2 değerinde sabit kalmaktadır. Borlanmamış malzemenin sürtünme katsayısının ise 0.6-0.8 aralığında kaldığı görülmüştür. Borlanmamış malzemenin sertliği 250 HV olarak ölçülmüş iken, borlanmış tabakanın sertliğinin 1500 HV olduğu görülmüştür.

C.K.N. Oliveira ve diğ. [63], AISI D2 çeliğini, ferroneobyum, ferrovanadyum veya ferrotitanyum içeren farklı boraks banyolarında kimyasal reaksiyon uygulamış ve neobyum-karbür (NbC), vanadyum-karbür (VC veya V_8C_7) ve demir-borür (FeB-Fe_2B ve CrB) tabakaları elde etmişlerdir. Bu işlemler sonucunda; NbC içeren tabakaların 15.6±1.2 μm kalınlığında ve 2372±93 HV sertliğinde olduğu, VC veya V_8C_7 içeren tabakaların ise 14.2±1.0 μm kalınlığında ve 2461±112 HV sertliğinde olduğu görülmüştür. Malzeme yüzeyinde FeB-Fe_2B ve CrB tabakalarının oluşmasını sağlayan ferrotitanyum içeren boraks banyosu uygulaması sonucunda ise 35-60 μm kalınlığında ve 1537±57 HV sertliğinde borür tabakaları oluşmuştur. Oluşan bu tabakaların (NbC, VC veya V_8C_7, FeB-Fe_2B ve CrB) ana malzme ile mükemmel bir metalurjik bağ oluşturduğu görülmüştür. Mikro-abrasiv aşınma testi sonrasında ise; Neobyum ve Vanadyum karbürlerin, borür tabakasına göre aşınmaya daha yüksek direnç gösterdikleri ve ayrıca Vanadyum karbürün aşınma direncinin Neobyum karbürden biraz daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

C. Li ve diğ. [64], Ti_3SiC_2 alaşımının yüzey özelliklerini iyileştirmek amcıyla 1100-1400 ^oC aralığında katı borlama yapmışlardır. Borlama sonucunda yüzeyde TiB_2 ve β-SiC den oluşan bir karışım tabakasının oluştuğu görülmüştür. Sertlik ölçümü sonrasında ise; borlama öncesinde 3.7 GPa olan sertlik değerinin 9.3 GPa'a kadar yükseldiği görülmüştür. Sürtünme katsayısı deneyleri sonucunda da borlama öncesinde 0.65-0.70 olan sürtünme katsayısının 0.54 değerine düştüğü ve aşınma testleri sonrasında da borlanmış yüzeyin aşınma direncinin oldukça iyi olduğu görülmüştür.

Asthana, P. Ve diğ. [65], %99.97 saflıktaki demir numuneleri 800, 875 ve 950 ^oC sıcaklıklarda 4 saat süreyle borlamışlardır. İncelemeleri sonucunda B atomlarının bor tabakasından daha derinlere nüfuz ettiğini tespit etmişlerdir. Borlanmış numunelere sürtünme ve aşınma testi de uygulamışlar ve 875 ^oC de borlanmış numunenin aşınma dayanımının diğerlerine göre daha iyi olduğunu belirlemişlerdir. Aşınma dayanımının iyi olmasında yüzeydeki tane büyüklüğü dağılımının önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir.

O. Allaoui ve diğ. [66], XC38 çeliğini %70 oranında sodyum tetra borat ($Na_2B_4O_7$) ve %30 oranında üç değişik seyreltici B_4C (boron carbide), Al ve SiC içeren sıvı ortamlarda 950 ^oC'de 4 saat süreyle borlamışlar ve bor tabakasının mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Al ve B_4C içeren ortamda yapılan borlamada iki fazlı (FeB ve Fe_2B) borür tabakası oluşurken, SiC içeren tabaka ise tek fazlı (Fe_2B) borür tabakası oluşumunu sağlamıştır. Bütün borür tabakalarının sertliğinin borlanmamış numuneye göre arttığı, borlanmamış numunenin sertliği 180 HV olarak ölçülmüş iken, FeB fazı içeren tabakanın sertliği 2100 HV ve Fe_2B fazı içeren tabakanın sertliği ise 1800 HV sertlikte olduğu belirlenmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda da SiC ile elde edilen tek fazlı tabakanın aşınma direncinin diğerlerine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Hüseyin Çelikkan ve diğ. [67], Ti6Al4V alaşımını oda sıcaklığında BBr_3 kullanarak elektrokimyasal yöntemle borlamışlar, daha sonra ise 500, 700 ve 900 ^oC'de 2 saat süreyle temperlemişlerdir. XRD analizi sonucunda numune yüzeylerinde TiB ve TiB_2 içeren tabakalar oluştuğu görülmüştür.

Sukru Taktak [68], sıcak iş çeliği olan AISI H13 çeliği ile AISI 304 paslanmaz çeliğini 800-850-900 ve 950 ^oC sıcaklıklarda 3, 5 ve 7 saat sürelerle %60 boraks, %20 borik asit ve %20 ferrosilikon içeren sıvı ortamda borlamışlardır. XRD analizi sonucunda H13 çeliğinde FeB, Fe_2B, CrB fazlarının, 304 çeliğinde ise FeB, Fe_2B, CrB ve Ni_3B fazlarının oluştuğu görülmüştür. Bor tabakası kalınlıkarının H13 çeliği için 8-58 µm aralığında, 304 çeliği için ise 4-42 µm aralığında değiştiği görülmüştür. Sertlik ölçümü sonucunda, ortalama sertliğin H13 çeliği için 1860 HV ve 304 çeliği için de 2150 HV olduğu belirlenmiştir. 304 çeliğinin sertliğinin yüksek olmasında bu çelikte bulunan krom ve nikel alaşım elementlerinin etkili olduğu değerlendirilmiştir. Krılma tokluğu hesabı soncunda, kırılma tokluğunun H13 çeliği için 4.16-3.12 MPa $m^{1/2}$ değerleri arasında, 304 çeliği için de 4.08-2.45 MPa $m^{1/2}$ değerleri arasında değiştiği hesaplanmıştır. Borlama süresi ve sıcaklığının artmasıyla da kırılma tokluğu değerinin azaldığı ve yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığı görülmüştür.

I. Campos ve diğ. [69], AISI 1045 ve M2 çeliklerinde pasta macun ile borlama sonucunda Fe_2B ve FeB oluşumunu incelemişlerdir. Borlama işlemi, 1045 çeliği için 1193, 1223 ve 1273 K sıcaklıkları aralığında 2 ve 6 saat sürelerle, M2 çeliği için ise 1223, 1253 ve 1273 K sıcaklıklarda ve yine 2 ve 6 saat sürelerle yapılmıştır. M2

çeliğinde oluşan bor tabakasının 1045 çeliğinde oluşan tabakaya göre daha az testere dişi yapıya sahip olduğu belirlenmiştir.

I. Campos ve diğ. [70], AISI 1045 çeliğini 5 mm kalınlığındaki pasta macun ile 1193, 1223 ve 1273 K sıcaklıklarında 4 ve 6 saat sürelerle borlamışlar ve malzeme yüzeyinde Fe_2B bileşikleri oluşturmuşlardır. Oluşan Fe_2B fazının sertliği 200 g ağırlık ile Vicker yöntemiyle ölçülmüş ve bu tabakanın kırılma davranışı incelenmiş ve kırılgan bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.

1.3 Plazma (İyon) Borlama

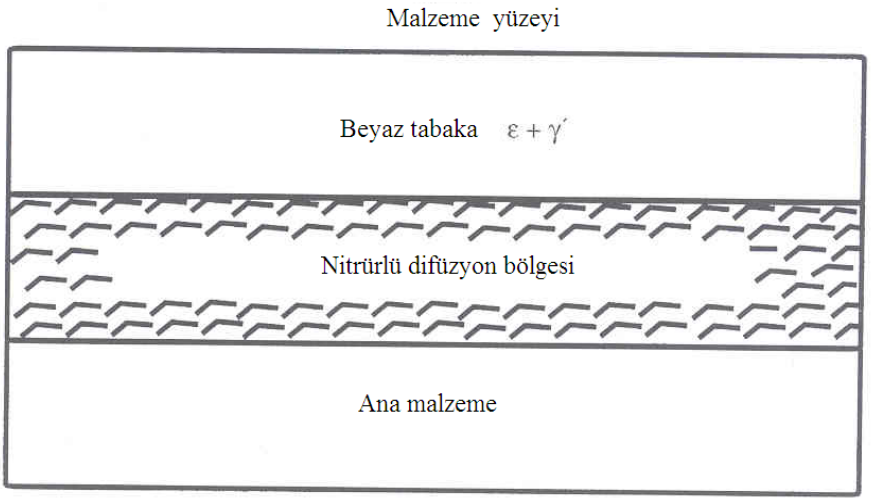
Yukarıda borlama ile ilgili değişik yöntemler kısaca tanıtılmıştır. Bu bölümde ise bu alışmada kapsamında borlama yöntemi olarak kullanılan plazma (iyon) borlama yöntemi daha geniş olarak incelenecektir.

Takımların, plaketlerin veya iş parçalarının aşınmaya ve yüzey basıncına dayanması için yüzeylerinin sert, özellikle kesici takımlarda da darbe mukavemeti bakımından iç kısmın tok olması istenir. Bunu sağlamak için yüzey sertleştirme işlemi yapılır. Yüzeyin bileşimini değiştirerek yapılan işleme "termokimyasal yüzey sertleştirme" adı verilir. Borlama işlemi, nitrürleme ve nitrokarbürleme gibi termokimyasal bir yüzey serleştirme yöntemidir. Yüzeyde ince, sert bir tabaka oluşur. Plazma (iyon) borlama işlemi plazma nitrürlemenin benzer bir yöntemi olduğu için bu bölümdeki açıklamaların çoğu plazma nitrürleme baz alınarak yapılacaktır.

İyon nitrürleme, metallerin yüzey sertleşmesinde çok çeşitli uygulamalarda kullanılan bir yüzey sertleştirme işlemidir. İsminden de anlaşılabileceği gibi, işlemde yalnızca iyonlaşmış azot veya iş yüzeyi ile reaksiyona giren diğer gazlarla karışım halinde kullanılır. İyon borlamada ise BF_3, BCl_3, BBr_3 gibi iyonlaşabilen ve atomlarına ayrılabilen değişik gazların H_2 ve/veya Ar gazları ile karıştırılması suretiyle borlama işlemi yapılmaktadır. İyonlaşmış bor gazı (BF_3), iş parçalarının çevresinde mor akım (purple glow) sağlar. İşlem, olası gazların uzaklaştırılması için bir vakum kabından, akımı başlatmak için gerekli olan, en azından 800 – 1000 Volt kapasitesinden yüksek voltajlı güç kaynağından, bir gaz dağıtım sisteminden ve bir basınç kontrol sisteminden oluşur [71].

Nitrür tabakası, Şekil 1.4'da görüldüğü gibi iki kısımdan oluşmaktadır. Nital ile dağlandıktan sonra beyaz göründüğünden dolayı dıştaki tabakaya beyaz tabaka denilmektedir. Beyaz tabaka genellikle iki fazdan oluşur. $Fe_{2-3}N$ kimyasal formülüne

sahip epsilon fazı (ε) ile Fe_4N kimyasal formülüne sahip gama üssü (γ′) fazıdır. Yaklaşık olarak 10–20 mikron kalınlığındaki bu tabaka aşınmaya dayanıklıdır. Daha kalın tabaka çatlar ve yorulma dayanımını düşürür. İçteki difüzyon tabakasında ise, azot miktarı çok fazla değilse yalnızca alaşım elemanlarının çok ince nitrürleri oluşur. Azot miktarı artarsa içe doğru tane sınırlarında demir nitrür ağı ortaya çıkabilir. Bu durum gevrekleşme bölgesini genişletir. Yorulma dayanımının yükseltilmesinde difüzyon tabakası rol oynar [71].



Şekil 1.4 : İyon nitrürleme ile oluşan faz yapıları [71].

İş parçası negatif (katot), kap ise pozitif (anot) durumdadır. İşlem koşulları altında voltaj uygulandığı zaman, akım geleneksel gaza benzer olarak veya akım boşalımı (glow discharge) olarak geçeçektir.

Önemli bir boşalım özelliği de saçılmalıdır (sputtering). Bu işlem, nitrürlemeye başlamadan önce iş yüzeyinin temizlenmesi için kullanılır. Saçılma, argon veya hidrojen gibi bir gazın kullanımı ile yapılır. 1 Torr'un altındaki düşük basınçlarda ve tercihen 700 Volt'un üzerindeki yüksek voltajlarda parça yüzeyinde iyon bombardımanı oluşarak yüzey pislikleri uzaklaştırılır [71].

Yukarıda tanımlanan tüm olaylar düşük basınçta gaz boşalımının bir sonucudur. Boşalımın kendisi, iyonlaşmış gaz karışımı boyunca geçen bir elektrik akımı basitliğindedir. Başlangıçta, anot ve katottan geçen bir voltaj uygulamasından önce iyonlaşmamış gaz molekülleri, yüksek bir elektriksel özdirenç halindedir.

Voltaj artınca, anot ve katoda yerleşen gaz molekülleri iyonlaşmaya, özdirenç azalmaya başlar. Sonunda parçalar yeterince iyonlaşır, bundan dolayı plazma

tutuşması (plazma ignition) oluşur. Bu nokta, iyonlaşmanın kendi kademesinde bir sonucu olarak plazma özdirenci keskin bir şekilde düşer, bundan dolayı daha düşük voltaj, akım değerini korumak veya artırmak için yararlıdır.

Bu prosesi oluşturan mekanizma, katot metalinin içindeki elektronların anoda doğru yüzeyinin hızlanmasının durması (voltaj ile) serbest kalmasıdır. Daha yüksek basınçlarda, gaz molekülleri ile karşı karşıya gelen bu elektronların çarpışmaları katot yüzeyine çok yakındır. Eğer yeterli enerji varsa, moleküller bağımsız olarak yön değiştirecek ve aynı etkiye sebep olan diğer moleküller için enerji çevriminde olan bir veya daha fazla valans elektrotu serbest kalacaktır (iyonlaşma) [71].

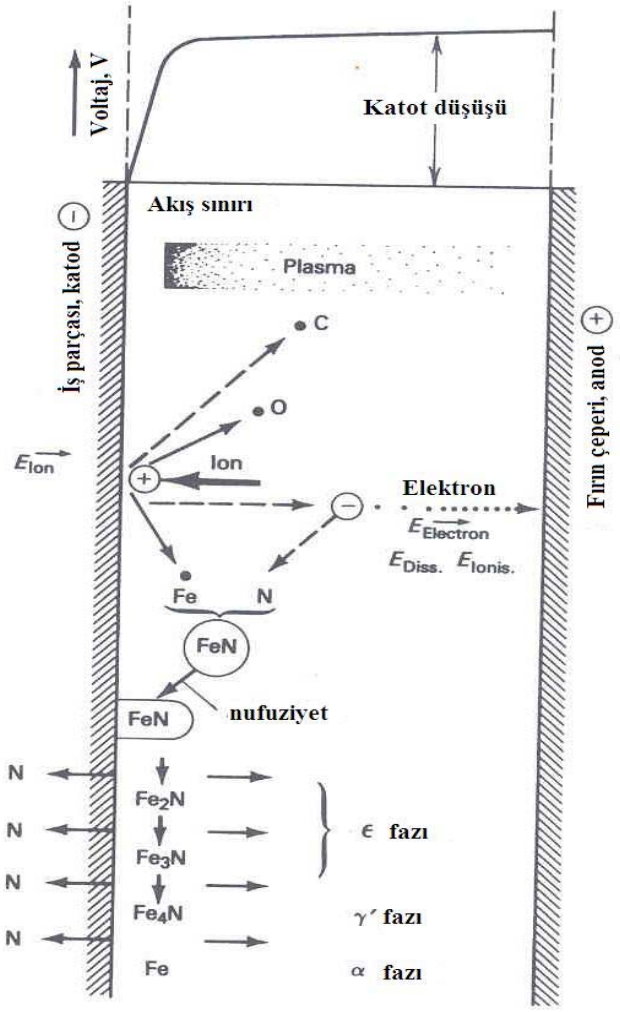
Katot ve anoda çok yakın bölgeler, kendileri tarafından iyonlaşmaya sebep olan yeterli elektrik alanı direncine sahiptir. Bu, daha fazla karşı karşıya gelmeleri ve sonuç olarak iyonlaşma ile sonuçlanır. Pozitif gaz iyonları negatif katodu ve negatif yüklü elektronlar pozitif anodu çekerler, böylece net akım akışına sahip olunur. Bu işleme İyon Nitrürleme adı verilir [71].

Şekil 1.5'de, anottan katoda voltaj düşümü gösterilmektedir. Eğrinin eğim ve dönüm noktaları, basınç, voltaj, akım ve gaz tipinin fonksiyonu olarak değer alır. Eğride görüldüğü gibi, en geniş voltaj düşümü katot bölgesinde çok yakın yerlerdir, daha küçük düşüş anoda çok yakındır ve hemen hemen voltaj düşümünün olmadığı yer ikisinin arasındadır. Bu, dinamik bir özdirenç değişiminin plazmadan geçtiğini gösterir. Başka bir deyişle, düşüşlerin büyük olduğu yerde, daha düşük voltaj düşümü olan bölgeye bağlı olarak bölgesel yüksek özdirenç vardır. En geniş voltaj düşümü bölgesinde, güç kaynağı tarafından üretilen enerjinin çoğu alınır, yani katot bölgesi bu enerjinin en büyük çoğunluğunu tüketir.

Katot bölgesi yakınındaki daha yüksek özdirenç, katottan fırlayan negatif yüklü elektronlar ile çarpışan pozitif yüklü gaz iyonlarının geniş parçacıkları için yeterlidir. Anot bölgesi uygulamalarında ise tam tersi olarak, elektronlar birikerek gaz iyonları ile katoda doğru fırlar. Bununla birlikte, elektronun küçük bağıl boyutundan dolayı, anot bölgesinde bir kaç çarpışma ile sonuçlanan gaz iyonları için daha çok serbest yol vardır.

Yukarıda anlatılan işlem ısı şeklinde iş yüzeyine enerji sağlar. Gaz olarak azot kullanıldığında katot, demirle reaksiyona giren azot iyonlarıyla bombardıman edilir, sonra herhangi bir alaşım elemanıyla nitrür oluşur (bileşik tabaka veya beyaz tabaka)

(compound layer – white layer). Bu iyon Nitrürleme İşleminin fiziksel temelidir. Diğer önemli olay, akım anormal boşalım bölgesinin üzerinde arttığı zaman oluşur. Buna ark oluşumu (arcing) adı verilir.



Şekil 1.5 : İyon nitrürlemede akım boşalım mekanizması [73].

İyon nitrürlemenin temel reaksiyon mekanizması, daha önce anlatıldığı gibi saçılan demirin gaz halindeki atomik azot atomları ile reaksiyona girmesi ve Şekil 1.5'de şematik olarak gösterilen azot atomlarının serbest kalması ile kararlı olmayan FeN oluşmasıdır. Bu mekanizma dört aşamada gerçekleşir [71]:

1.aşama: Azot atomlarının iyonizasyonu:

$$e^- \rightarrow N_2 = N^+ + N + 2e^- \qquad \textbf{(1.1)}$$

2.aşama: Saçılma olarak adlandırılan işlem ile iş parçası yüzeyinden kirliliğin giderilmesi. Ortaya çıkan kirliliğin vakum pompası ile atılması ve iyonlaşmış azot tarafından Fe'in saçılması:

$$N^+ \rightarrow \textit{İş parçası yüzeyine (katot) = Fe saçılımı} \quad \textbf{(1.2)}$$

3.aşama: Saçılan Fe atomlarının iş parçası yüzeyinde çarpması sonucu nitrür tabakasının oluşması. Bu aşamada atomik bilyalı dövme olarak söylenebilecek hassas yüzey temizleme işlemi de gerçekleşir.

$$\textit{Saçılan } Fe + N = FeN \quad \textbf{(1.3)}$$

4.aşama: Sürekli plazma bombardımanı altında katot yüzeyinde FeN oluşumu, Plazma, ε fazında dönüşüme başlayan, γ′ fazını takip eden ve daha sonra demir/azot bileşik tabakanın oluşumunu sağlayan, FeN'in kararsızlığına sebep olur (Şekil 1.5) [73].

$$FeN \rightarrow Fe_2N + N \quad \textbf{(1.4)}$$

$$Fe_2N \rightarrow Fe_3N + N \quad (\varepsilon - \textit{fazı}) \quad \textbf{(1.5)}$$

$$Fe_3N \rightarrow Fe_4N + N \quad (\gamma' - \textit{fazı}) \quad \textbf{(1.6)}$$

$$Fe_4N \rightarrow Fe + N \quad \textbf{(1.7)}$$

Genellikle % 5'den daha az azot ve temel gaz karışımında beyaz tabaka yoktur. Bu karışım ile demir nitrürlerin beyaz tabakası oluşmaz. Parça yüzeyi, krom, molibden, alüminyum, vanadyum ve titanyum gibi alaşım elemanlarının nitrür çökeltilerinin difüzyon tabakasıdır. Genellikle, % 15-30 azot ve temel gaz karışımında γ′ fazı oluşur. Bu gaz karışımı, daha çok tek fazlı γ′ kristal (Fe_4N) çok ince bileşik tabakasıdır. Yaklaşık olarak % 60-70 azot, % 1-3 metan ve temel gaz karışımında genellikle ε fazı oluşur. Bu gaz karışımı, daha çok tek fazlı ε kristal yapı ($Fe_{2-3}N$) oluşturur. Fırında parça ne kadar uzun kalırsa, beyaz tabaka o kadar kalın ve difüzyon tabakası o kadar fazladır. Daha yüksek sıcaklık, daha az zamanda daha kalın beyaz tabakasının oluşmasına neden olacaktır [74].

Genelde nitrürlemeye malzemenin tepkisi güçlü nitrür oluşturma elemanlarının varlığına bağlıdır. Sade karbon çelikleri nitrürlenebilir ama yüzey, çekirdekten kayda değer biçimde daha sert değildir. En güçlü nitrür oluşturucular; alüminyum, krom, molibden, vanadyum ve tungstendir. Çünkü beyaz katman öğeleri sadece demir ve

nitrojen bileşikleridir. Bu katmanların sertliği esasında alaşım muhteviyatından bağımsızdır [71].

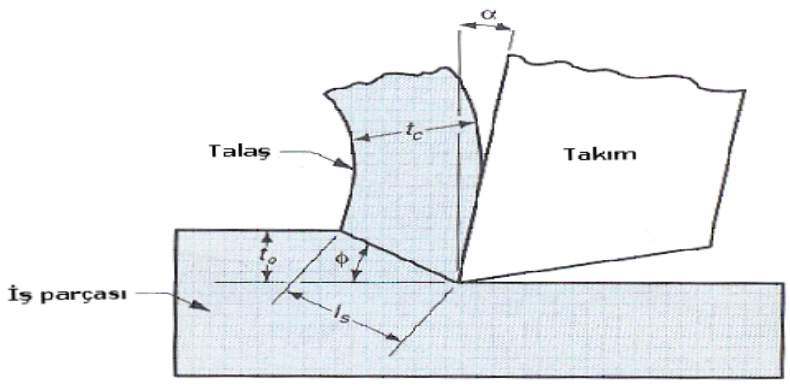
Başlangıçtaki nitrürleme çelikleri Nitralloy (Nitrür-alaşım) serisidir. Bunlar, ağırlıkça yaklaşık olarak % 1 Al, % 1,0-1,5 Cr içerir. Mükemmel yüzeyler oluşturan diğer alaşımlar 4100, 4300, 5100, 6100, 8600, 8700, 9300 ve 9800 serileri gibi krom esaslı alaşımlardır. Diğer iyi nitrürleme malzemeleri alet ve metal kalıp çeliklerinin pek çoğu, paslanmaz çelikler ve çökelme sertleştirme alaşımlarıdır.

T/M yoluyla yapılan parçalara da iyon nitrürleme yapılabilir ama ön temizleme porozite karakteristiklerinden dolayı daha kritiktir. Temizleme çözeltilerinin buharlaştırılması ve/veya kalıntıların kırılması veya ayıklanması için iyon nitrürleme yapılacak parçaların bir fırınlama işlemine tabi tutulması gerekir.

Karbon çeliği veya döküm demirlerde difüzyon bölgesinde kayda değer bir sertleşme elde edilemez. Bununla birlikte bir bileşik bölgesi oluşturulabilir ve genellikle bu bileşik bölgesi hafif yüklenen parçalarda aşınma direnci açısından mükemmeldir. Çünkü bileşik bölgesi göreceli olarak yumuşak bir difüzyon bölgesi ile desteklenmektedir. Bu malzemelerin yüksek lokal gerilmelere maruz kalmaları önlenmelidir.

1.4 Ortogonal Talaş Kaldırma Teorisi

Plazma borlanmış kesici uçlara ikinci bölümde anlatılacak olan ortogonal talaş kaldırma denyleri de yapılacağından bu bölümde ortogonal talaş kaldırma işleminin teorisi kısaca anlatılacaktır. Şekil 1.6'da gösterilen ortogonal kesme terosine göre; α : talaş açısı, Ø: kayma açısı, t_0: kesme derinliği (tornalamada ilerleme), t_c: talaş kalınlığı, l_s: kayma düzlemi genişliği değerlerini vermektedir.



Şekil 1.6 : Ortogonal kesme.

Bu değerlere göre talaş oranı (r) ve kayma açısı değerleri (Ø) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$r = \frac{t_0}{t_c} \tag{1.8}$$

$$t_0 = l_s \sin\phi \tag{1.9}$$

$$t_c = l_s \cos(\phi - \alpha) \tag{1.10}$$

(1.9) ve (1.10) formülleri (1.8)'de yerine konulursa;

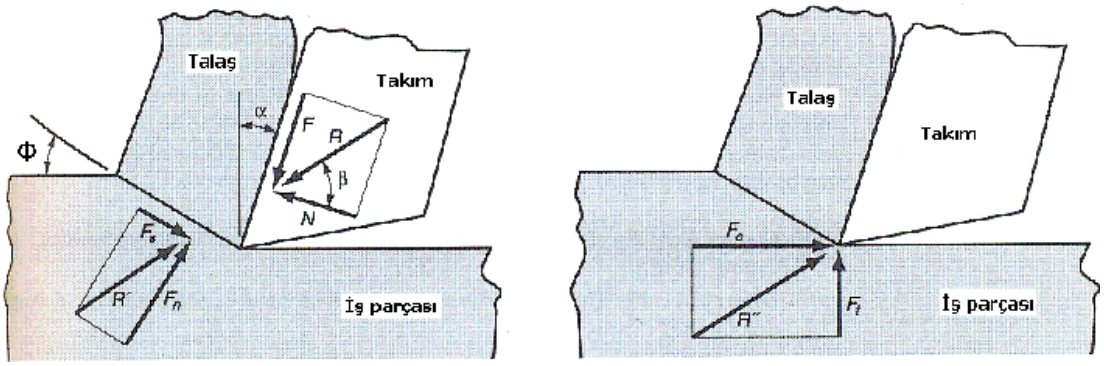
$$r = \frac{l_s \sin\phi}{l_s \cos(\phi - \alpha)} \tag{1.11}$$

elde edilir. Bu denklemde bazı düzenlemeler yapılırsa kayma açısı;

$$\phi = \arctan\left(\frac{r\cos\alpha}{1 - r\sin\alpha}\right) \tag{1.12}$$

şeklinde elde edilir.

Ortogonal kesme modelinde oluşan kuvvetler ise Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



Şekil 1.7 : Ortogonal kesme modelinde oluşan kuvvetler.

Buradaki değişkenler; β: Sürtünme açısı, μ:Sürtünme katsatyısı, F: Sürtünme kuvveti, N: Normal kuvvet, F_s:Kayma kuvveti, F_n: Normal kuvvet, τ: Kayma gerilmesi, A_s: Kayma düzelemi alanı, F_c: Kesme kuvveti, F_t: Teğetsel kuvvet, R: Bileşke kuvvetlerini ifade etmektedir. Bu durumda sürtünme katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\mu = \frac{F}{N} = \tan\beta \tag{1.13}$$

Kayma bölgesinde oluşan kayma gerilmesi ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \tag{1.14}$$

Buradaki A_s kayma düzlemi alanı ise;

$$A_s = \frac{t_0 w}{\sin \phi} \tag{1.15}$$

ile hesaplanmaktadır. Ortogonal kesme modelinde yukarıda belirtilen F, N, F_s ve F_n kuvvetleri doğrudan ölçülememektedir. Dolayısıyla Şekil 1.7'de belirtilen F_c ve F_t kuvvetleri dinamometre ile ölçülerek aşağıda belirtilen kuvvet dönüşüm formülleri ile F, N, F_s ve F_n kuvvetleri hesaplanabilmektedir.

$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \tag{1.16}$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \tag{1.17}$$

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \tag{1.18}$$

$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \tag{1.19}$$

Dinamometre ile ölçülen F_c ve F_t kuvvetlerinin her biri kayma bölgesinde ve kesici takım kenarında oluşan iki kuvvet bileşeninden meydana gelmektedir [75]. Bu durumda F_c ve F_t kuvvetleri için aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$F_c = F_{cs} + F_{ce} \tag{1.20}$$

$$F_t = F_{ts} + F_{te} \tag{1.21}$$

F_{ce} ve F_{te} kuvvetleri takım kenarında oluşan kuvvet bileşenlerini, F_{cs} ve F_{ts} kuvvetleri ise kayma bölgesinde oluşan kuvvet bileşenlerini ifade etmektedir. F_{ce} ve F_{te} kuvvetlerini elde edebilmek için; kesme kuvveti (F_c) ve teğetsel kuvvetler (F_t) farklı kesme derinliklerinde ölçülür. Farklı kesme derinliklerinde elde edilen kuvvet-kesme derinliği değerleri interpolasyon yapılarak sıfır kesme derinliğindeki kuvvet değeri elde edilir. Sıfır kesme derinliğinde kesme kuvveti (F_c) için elde edilen değer F_{ce} kuvvet değerini, sıfır kesme derinliğinde teğetsel kuvvet (F_t) için elde edilen değer F_{te} kuvvetini oluşturur [75]. Bu kuvvetler elde edildikten sonra (1.20) ve (1.21) denklemleri yardımıyla dinametreden okunan kuvvet değerleri de kullanılarak F_{cs} ve F_{ts} kuvvetleri de hesaplanır.

F_t ve F_c kuvvetlerini, kesme sabitleri (K_{tc} ve K_{fc} (N/mm^2)) ile kenar katsayıları (K_{te} ve K_{fe} (N/mm)) cinsinden aşağıdaki gibi yazmak da mümkündür [75]:

$$F_c = K_{fc} w t_0 + K_{fe} w \quad \textbf{(1.22)}$$

$$F_t = K_{tc} w t_0 + K_{te} w \quad \textbf{(1.23)}$$

(1.22) ve (1.23) denklemlerini kullanarak ortogonal kesme için kesme sabitlerini (K_{tc} ve K_{fc}) ile kenar katsayılarını (K_{te} ve K_{fe}) bulmak mümkündür.

Kayma bölgesindeki etkin bileşke kuvvet R_s (1.20) ve (1.21) yardımıyla aşağıdaki şekilde elde edilir [75]:

$$R_s = \sqrt{F_{cs}^2 + F_{ts}^2} \quad \textbf{(1.24)}$$

(1.14), (1.15) ve (1.22) yardımıyla kayma gerilmesi ise aşağıdaki şekilde elde edilir [75]:

$$\tau = \frac{R_s Cos(\phi + \beta_s - \alpha)}{(w t_0 / \sin\phi)} \quad \textbf{(1.25)}$$

Etkin sürtünme açısı β, (1.13), (1.11) ve (1.17) denklemlerinden aşağıdaki gibi de elde edilir:

$$\beta = \alpha + Arc\tan\frac{F_c}{F_t} \quad \textbf{(1.26)}$$

Kayma bölgesindeki F_{cs} ve F_{ts} kuvvetlerinin etkisiyle oluşan sürtünme açısı β_s ise benzer şekilde aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\beta_s = \alpha + Arc\tan\frac{F_{cs}}{F_{ts}} \quad \textbf{(1.27)}$$

2.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 WC Kesici Takım Uçları

İyi bir takım malzemesinin sahip olması gereken özellikler; yüksek sertlik, yüksek eğilme mukavemeti, yüksek basma mukavemeti ve tokluk, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya karşı dayanıklılık, kolay işlenebilmesi, ucuz olması ve kolay bulunabilir olması şeklinde sıralanabilir. Ancak bu özelliklerin hepsi bir bütün olarak değerlendirildiğinde, bütün bu özelliklere sahip bir takım malzemesinin olmadığı görülmektedir. Genellikle yüksek sertliğe sahip, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya dayanıklı takım malzemeleri; eğilme, basınç ve darbelere karşı mukavemetleri düşük, zor işlenebilen pahalı malzemelerdir. Genel olarak takım malzemelerini aşağıdaki gruplar altında incelemek mümkündür:

Takım Çelikleri: Karbon (alaşımsız) takım çelikleri, az alaşımlı takım çelikleri ve hız çelikleri bu grubu oluşturan takım malzemeleridir. Alaşımsız takım çelikleri; karbon miktarları % 0.6-1.4 arasında değişen, maksimum çalışma sıcaklığı 200-250^{o}C olan, kesme hızları genellikle 10 m/dk'dan küçük, sertleştirilmeleri sırasında şekil bozukluklarının meydana gelme ihtimali yüksek olan, diğer takım malzemelerine göre kolay işlenebilen ve ucuz olan takım malzemeleridir. Az alaşımlı çelikler ise kesme özelliklerinin iyileştirilmesi için alaşımsız takım çeliklerine krom, Vanadyum, tungsten molibden, manganez gibi alaşım elementleri ilave edilmiş takım malzemeleridir. Bu takım malzemeleri alaşım elementlerine bağlı olarak havada ve yağda sertleştirilebildiğinden yağ ve hava çelikleri olarak da isimlendirilirler. Kesme özellikleri bakımından alaşımsız takım çeliklerine benzerdirler. Hız çelikleri % 4 Krom ve % 1.2-19 Volfram içeren yüksek alaşımlı çeliklerdir. Bu takım malzemelerinde çalışma sıcaklığı olarak 600 ^{o}C, kesme hızı olarak da 30-40 m/dk'ya ulaşmak mümkün olmaktadır.

Sinterlenmiş Karbürler: Bu takım malzemeleri, bağlayıcı malzemeleri kobalt olan; tungsten, titan ve tantal karbürlerinin sinterlenmesi ile elde edilirler. Bunun için öncelikle toz halindeki karbürler preslenerek ön şekil verilir, elektrik fırınlarında ön sinterleme yapılır ve taşlandıktan sonra 1400-1600 ^{o}C'de son sinterleme işlemi

yapılır. Çok sert, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya dayanıklı ve kesme hızının yüksek olması nedeniyle günümüzde yaygınca kullanım alanı bulmaktadır. Eğilme ve darbe mukavemetlerinin düşük olması ve pahalı olmaları önemli dezavantajlarıdır.

Seramik Takımlar: Alüminyum oksidin sinterlenmesi yolu ile elde edilen malzemelerdir. Yüksek sıcaklığa ve aşınmaya karşı çok dayanıklı, yüksek hızlarında kullanılabilen takımlardır. Ancak darbe ve eğilme mukavemetleri çok düşük olduğundan sadece ince talaş kaldırmada kullanılırlar. Çalışma sıcaklığı olarak maksimum 1800 ^{o}C'ye ulaşılabilirken, kesme hızı olarak da 1000 m/dk hızlarda çalışmak mümkün olmaktadır.

Elmaslar: Takım malzemesi olarak en sert malzeme, sıcaklığa ve aşınmaya karşı çok dayanıklı olmasına rağmen; çok kırılgan ve pahalı bir malzemedir. Kesme hızı olarak 3000 m/dk'ya ulaşmak mümkündür. İşlem sıcaklığı maksimum 1500 ^{o}C'dir. Çok kırılgan bir yapıya sahip olduklarından ince talaş kaldırma işlemlerinde tercih edilirler.

Bu çalışmada, talaşlı imalatta oldukça yaygın bir şekilde kullanılan tungsten karbür (WC) kesme takımlarının plazma (iyon) borürlenmesi yapılarak, bunun sertlik, metalografik yapı, kesme kuvveti, ortogonal kesme ve frezelemede aşınma parametrelerine etkisi incelenmiştir.

Kesici uç olarak Şekil 2.1'de gösterilen BÖHLER SPKN 1203 ED-R tungsten karbür kesici uçlar (iş emri no:06/2984-5) kullanılmıştır. Bu ucun seçilmesinde, içerisindeki borür yapıcı elementler ve dört kenarının da kesme amaçlı olarak kullanılabilmesi belirleyici olmuştur. Bu kesici uçlar, frezeleme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan uçlardır.



Şekil 2.1 : BÖHLER SPKN 1203 ED-R tungsten karbür kesici uç.

2.2 Deney Planı

Plazma borlama deneyleri için oluşturulan deney planı aşağıda verilen Çizelge 2.1'de görülmektedir.

Çizelge 2.1 : Plazma borlama deney planı.

Numune Numarası	Sıcaklık (^oC)	Süre (Saat)	Gaz Karışım Oranı
0	Borlanmamış Numune		
1	600	1	% 10 BF_3 , %40 Argon, %50 H_2
2		2	
3		4	
4		6	
5	700	1	
6		2	
7		4	
8		6	
9	800	1	
10		2	
11		4	
12		6	
13	850	1	
14		2	
15		4	
16		6	

Bu plandan da görüleceği üzere, 600, 700, 800 ve 850 ^oC'den oluşan dört değişik sıcaklıkta 1, 2, 4 ve 6 saat sürelerle % 10 BF_3 , %40 Argon, %50 H_2'den oluşan gaz karışım oranında plazma borlama yapılacaktır.

Deney planının bu şekilde seçilmesinde Bölüm 1'de ayrıntılı olarak verilen literatürde yapılmış olan çalışmalar, oluşturulan deney düzeneği kapasitesi ve temini zor olan mevcut BF_3 gazı miktarı etkili olmuştur. Deney odasına toplam debisi 1000 ml/dk olacak şekilde % 10 BF_3 , %40 Argon, %50 H_2 oranlarında üç gaz karışımı gönderilmiştir.

Kesici uçlar Şekil 2.13'de görüldüğü gibi deney odasına yerleştirildikten sonra deney odası kapatılmakta ve vakum pompası çalıştırılarak deney odasının vakuma alınması sağlanmaktadır. Deney odası yaklaşık 3-5 mmHg (Torr) basınca geldikten sonra rezistans açılarak proses sıcaklığına yaklaşıncaya kadar ısıtılmaktadır. Daha sonra doğru akım güç kaynağı açılmakta ve Şekil 2.2'de görülen plazma (glow discharge) oluşması sağlanmaktadır. Plazma oluşumu sağlandıktan sonra sisteme Ar ve H_2

gazları verilerek hem kesici uçların sıcaklıklarının artması sağlanmakta, hem de yüzeylerinin temizlenmesi sağlanmaktadır. Kesici uçların sıcaklığı proses sıcaklığına eriştiğinde ise sisteme BF_3 gazı da verilerek plazma borlama işleminin başlaması sağlanmaktadır. Gazların debi kontrolü Şekil 2.10'de gösterilen rotametre tipi debimetreler vasıtasıyla yapılmaktadır. Deney planında belirlenen süre tamamlandıktan sonra güç kaynağı ile BF_3 ve H_2 gazı kapatılmakta, deney odasına sadece Ar gazı gönderilerek kesici uçların Argon gazı ortamında soğuması sağlanmaktadır. Kesici uçlar oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra vakum pompası ve Argon gazı da kapatılarak deney odasının basıncının oda ortamına açık bir valfin açılması suretiyle yavaş yavaş atmosfer basıncına gelmesi sağlanmaktadır. Daha sonra deney odası Şekil 2.6'de gösterildiği gibi açılarak kesici uçlar deney odasından alınmaktadır. Böylece plazma borlama işlemi tamamlanmış olmaktadır.



Şekil 2.2 : Plazma oluşumu.

Plazma borlama işlemi yapılmış olan 9 numaralı numune Şekil 2.3'de görülmektedir.



Şekil 2.3 : Plazma borlanmış 9 numaralı numune.

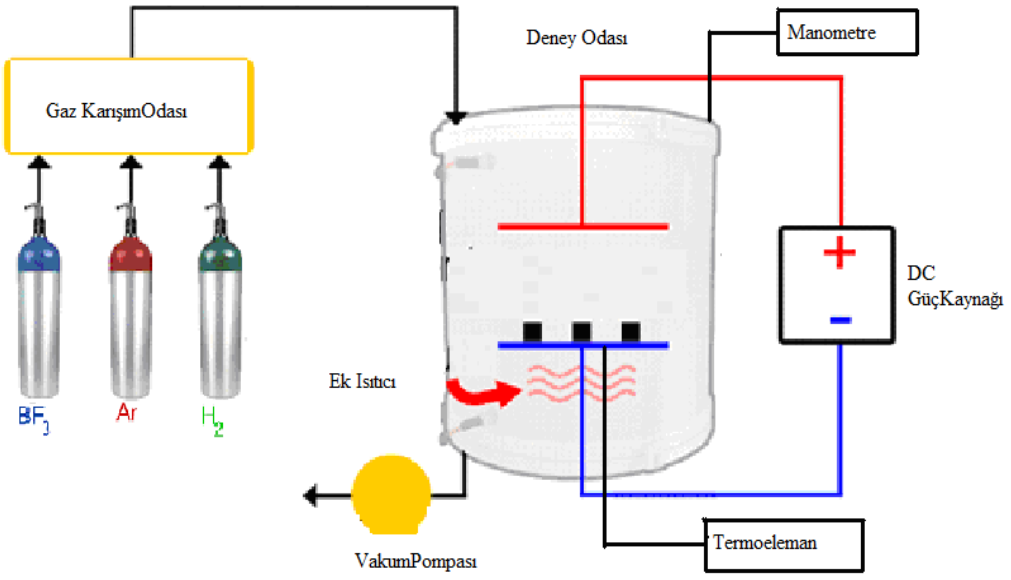
Plazma borlanmış kesici uçlara borlama işlemi sonrasında aşağıda belirtilen test ve ölçümler yapılarak; plazma borlamanın kesici takım üzerindeki etkileri incelenmiştir:

- Alın frezelemede oluşan bileşke kesme kuvveti ölçümü,
- Yüzey pürüzlülüğü ölçümü,
- Torna ile ortogonal kesme testleri,
- Alın frezeleme ile aşınma testleri,
- XRD ölçümleri,
- SEM ölçümü,
- Mikrosertlik ölçümü.

Yukarıda belirtilen test ve ölçümlerle ilgili detaylı bilgiler üçüncü bölümde sunulacaktır.

2.3 Deney Tertibatı

Plazma borlama işleminin yapılabilmesi amacıyla yapılan araştırma sonucunda borlayıcı ortam olarak BF_3 gazının kullanılmasına karar verilmiştir. Bu gazın kullanılmasında, alternatifi olan BCl_3 gazının yüksek korozif etkiye sahip olması da rol almıştır. BF_3 gazı, bir firma aracılığıyla İngiltere'den getirtilmiştir. BF_3 gazı, %99.5 safiyette, 10 lt su hacminde ve 100 bar basınçta paslanmaz çelik bir tüp içerisinde temin edilmiştir.



Şekil 2.4 : Plazma borlama deney düzeneği.

Şekil 2.4'de, plazma borlama deney düzeneğinin şematik resmi verilmektedir. Deneylerin yapılacağı deney odası CEMAŞ Makine San.Tic.A.Ş. firmasına imal ettirilmiştir. Deney odası paslanmaz çelik malzemeden ve yaklaşık 60 cm çapında, 60 cm yüksekliğinde, alt kapak, orta gövde ve üst kapaktan oluşan üç parça olacak şekilde yapılmıştır. Deney odası içerisinde bir adet 2 kW/ 10 V/200A değerlerinde KANTHAL FIBROTHAL rezistans bulunmaktadır. Deney odasının alt ve üst kapakları, orta gövde ve gövdenin alt ve üstünde bulunan flanşlar ayrı ayrı su soğutma sistemine sahiptir. Deney odasına gaz girşini sağlayan bir giriş vanası ve gaz çıkışını sağlayan bir de çıkış vanası mevcuttur. Güç kaynağı bağlantıları deney odasının alt ve üst tarafında bulunan ve gövdeden yalıtılmış elemanlar vasıtasıyla yapılmıştır. Basınç (vakum) ölçümü gaz giriş vanasına paralel olarak bağlanan U tipi bir civalı manometre ile yapılmaktadır. Gaz çıkış vanası özel olarak temin edilen korozyona dayanıklı bir vakum pompasına bağlanmakta ve böylece deney odasının vakuma alınması sağlanmaktadır. Sıcaklık ölçmek amacıyla K tipi bir termoleman kullanılmakta ve termoelemanlar alt kapak üzerinde bulunan iki adet çıkış bağlantısı yardımıyla dışarıya aktarılmakta ve dijital ölçüm sistemine bağlanmaktadır.

Sisteme gönderilecek gazların debisini ölçmek amacıyla rotametre tipi debimetreler temin edilmiştir. BF_3 gazının debisi 30-240 ml/dk (air) kapasiteli bir debimetre ile, Ar gazının debisi 50-500 ml/dk (air) kapasiteli bir debimetre ile ve H_2 gazının debisi de 100-1000 ml/dk (air) kapasiteli bir debimetre ile ölçülmüştür. Bu üç gaz debimeterelerden geçtikten sonra bir karışım hücresinde karıştırılmakta ve sonrasında deney odasına gönderilmektedir.

Güç kaynağı olarak kullanılmak üzere yeni bir DC güç kaynağı yapılmıştır. Mikrodalga fırınlarda kullanılan yüksek gerilim trafolarından iki adet temin edilerek bir elktronik devre oluşturulmuş ve bir kasa içerisine soğutma sistemleri de dahil edilerek monte edilmiş ve güç kaynağı oluşturulmuştur.



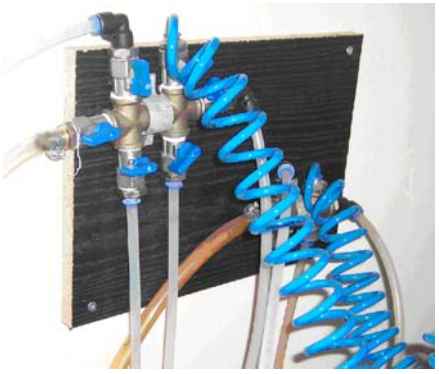
Şekil 2.5 : Plazma borlama deney odası.

Şekil 2.5'de, imal ettirilen plazma borlama deney odasının kapalı haldeki resmi görülmektedir. Deney odasına malzeme yüklenmesi ve çıkarılması sadece üst kapağın veya üst kapakla birlikte ana gövdenin deney odasına bağlı bir caraskal ile açılması suretiyle yapılmaktadır. Deney odasının açılmış haldeki resmi Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6 : Deney Odasının açılmış hali.

Deney odasının çeperlerinin soğutulması amacıyla kurulan su soğutma sistemi Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.7 : Su soğutma sistemi.

Basınç (vakum) ölçümünde kullanılan U tipi civalı manometre Şekil 2.8'de görülmektedir.



Şekil 2.8 : U tipi civalı manometre.





(a) **(b)**

Şekil 2.9 : (a) BF_3 gazının bulunduğu tüp, (b) Argon ve Hidrojen gaz tüpleri.

Deney sisteminde kullanılan BF_3, Ar ve H_2 gazlarının bulunudğu tüplere ait resimler Şekil 2.9'da, bu gazlara ait rotametre tipi debimetreler Şekil 2.10'da görülmektedir.



Şekil 2.10 : Gaz akış kontrol sistemi.

Sistemdeki gaz akışı ile deney odasının vakuma alınmasını sağlayan 8 l/dk debili paletli vakum pompası Şekil 2.11'de görülmektedir.



Şekil 2.11 : Vakum pompası.

Plazma borlama işleminde kullanılan ve yukarıda belirtildiği üzere tamamen yeniden dizayn ve imal edilen doğru akım güç kaynağı Şekil 2.12'de görülmektedir.



Şekil 2.12 : Doğru akım güç kaynağı.

Kesici uçlar deney odasına yerleştirilmeden önce trikloretilen ile iyice temizlenmekte ve ardından Şekil 2.13'de görüldüğü üzere alt tabla (katot) üzerine yerleştirilmektedir.



Şekil 2.13 : Kesici uçların deney odasına yerleştirilmesi.

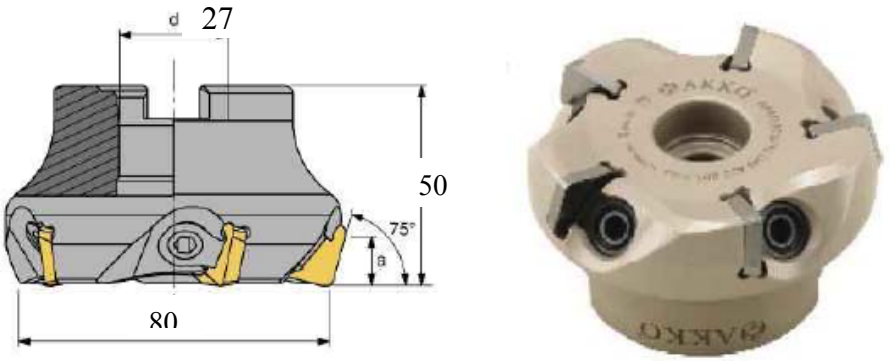
2.4 Deneylerin Yapılışı

2.4.1 Talaş kaldırma performansı ölçümleri

Çizelge 2.1'de verilen deney planına uygun olarak yapılan plazma borlama işleminden sonra, kesici uçlar, Koç Üniversitesi Üretim ve Otomasyon Araştırma Merkezi (MARC)'nde talaş kaldırma testlerine tabi tutulmuştur. Bu kapsamda öncelikle bu merkezde bulunan üç eksenli Mazak FJV-200 UHS CNC İşleme Merkezi ile alın frezeleme testlerine tabi tutulmuştur. Alın ferzeleme işleminde havacılık ve biyomedikal sanayiinde yaygın bir şekilde kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı kullanılmıştır. Alın ferzeleme işlemi esnasında oluşan kuvvetler ölçülerek bileşke kuvvetler hesaplanmış, ayrıca iş parçasında oluşan yüzey pürüzlülüğü ölçümleri de yapılmıştır. Frezelemede oluşan kuvvet testlerinden sonra MARC'da bulunan Mazak NEXUS 200-II CNC torna tezgahı ile ortogonal kesme testleri yapılmıştır. Talaş kaldırma testleri kapsamında son olarak da yine Mazak FJV-200 UHS CNC İşleme Merkezi ile alın frezelemede aşınma testleri yapılmıştır.

2.4.1.1 Alın frezelemede kesme kuvvetleri

Plazma borlanmış kesici uçlar daha önce de belirtildiği gibi BÖHLER Firmasından temin edilen BÖHLER SPKN 1203 ED-R tungsten karbür kesici uçlardır. Bu uçlar, Şekil 2.14'de gösterilen 6 uçlu alın ferzeleme takımına (AKKO- AFM75C-SP12-D80-A27-Z06 kodlu takım) [76] bağlanarak CNC işleme merkezinin takım tutucusuna monte edilmiştir.

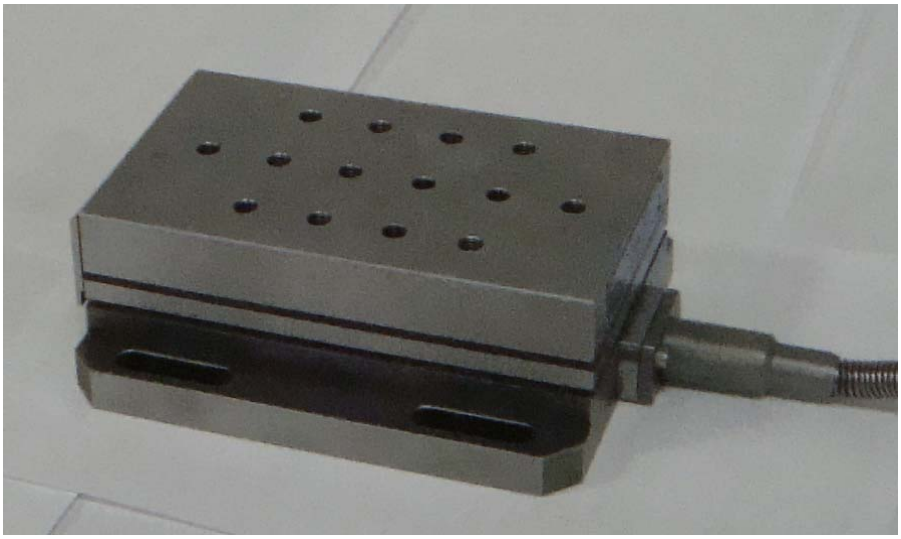


Şekil 2.14 : Alın frezeleme takımı [76].

Alın frezeleme esnasında X, Y ve Z eksenlerinde oluşan kuvvetlerin bileşkesi alınarak aşağıdaki formülle (2.1) toplam bileşke kesme kuvveti hesaplanmaktadır.

$$F_R = \sqrt{F_X{}^2 + F_Y{}^2 + F_Z^2} \tag{2.1}$$

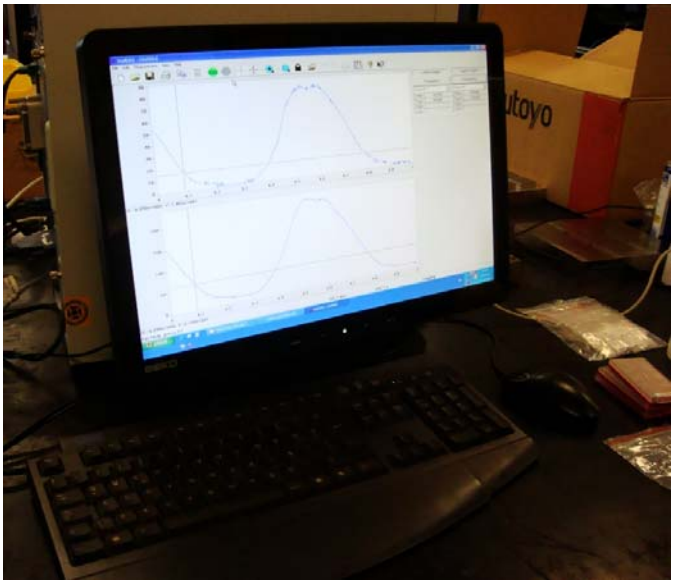
Alın frezeleme esnasında oluşan X, Y ve Z eksenleri yönündeki kuvvetler Şekil 2.15'de görülen ve tezgaha bağlanan üç eksenli Kistler Dinamometresi (Model 9257B) ve Şekil 2.16'da görülen çok kanallı veri toplama sistemi (DAQ) vasıtasıyla ölçülmüştür. Yapılan kuvvet ölçümleri Şekil 2.17'de görülen bilgisayar yazılımı ile elektronik ortama aktarılmıştır.



Şekil 2.15 : Kuvvet ölçüm dinamometresi.



Şekil 2.16 : Çok kanallı veri toplama sistemi (DAQ).



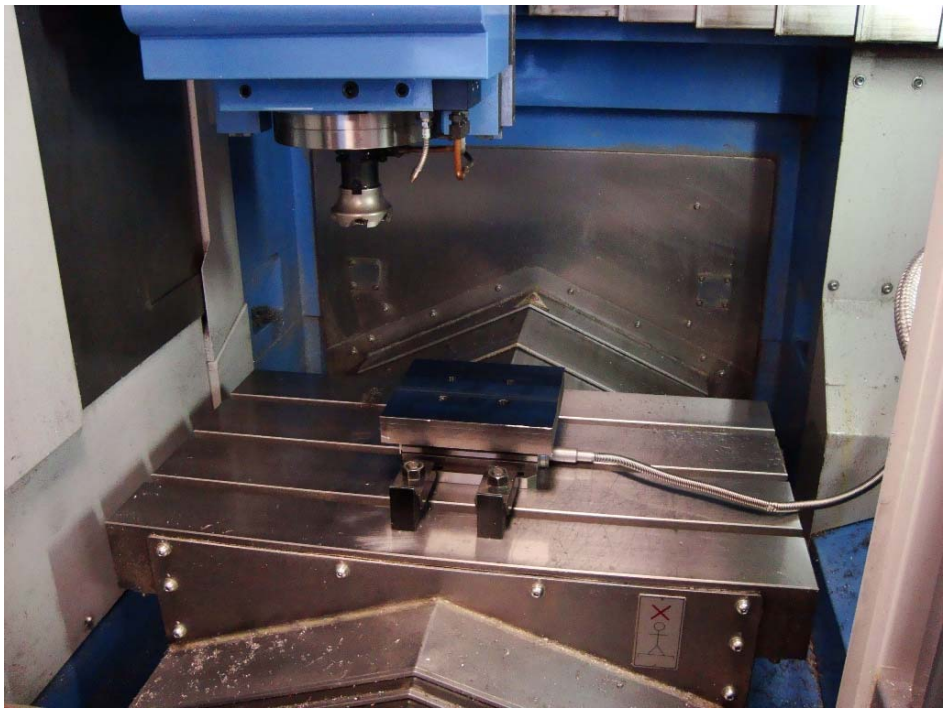
Şekil 2.17 : Kuvvet ölçümü.

2.4.1.2 Kesme kuvveti ölçümleri

Plazma borlanmış kesici uçların alın frezeleme işleminde Koç Üniversitesi Üretim ve Otomasyon Araştırma Merkezi (MARC)'nde bulunan ve Şekil 2.18'de gösterilen Mazak FJV-200 UHS CNC İşleme Merkezi kullanılmış ve havacılık ve biyomedikal sanayiinde yaygın bir şekilde kullanılan ve Şekil 2.19'da gösterilen Ti-6Al-4V alaşımı (grade 5) işlenmiştir.



Şekil 2.18 : Mazak FJV-200 UHS CNC işleme merkezi.



Şekil 2.19 : Ti-6Al-4V iş parçası.

Talaş kaldırma işleminde Çizelge 2.2'de verilen kesme şartları Çizelge 2.1'de verilen herbir numune için uygulanmış ve kuvvet ölçümleri yapılmıştır.

Çizelge 2.2 : Alın frezeleme işleme şartları.

Devir Sayısı (d/dk)	Kesme Derinliği (mm)	İlerleme Hızı (mm/dk)			
200	0,5	10	20	30	40
350					
500					
650					

2.4.2 Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

Yukarıdaki bölümde belirtilen kesme kuvveti ölçümlerinden sonra alın frezeleme işlemi sonucunda Ti-6Al-4V alaşımından yapılmış olan iş parçasının yüzey pürüzlülüğüne kesici uçların nasıl bir etkisinin olduğunu incelemek amacıyla yüzey pürüzlülüğü ölçümleri de yapılmıştır. Yüzey pürüzlülükleri Mitutoyo SJ-301 Surface Roughness ölçme cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 2.20).



Şekil 2.20 : Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.

2.4.3 Ortogonal talaş kaldırma deneyleri

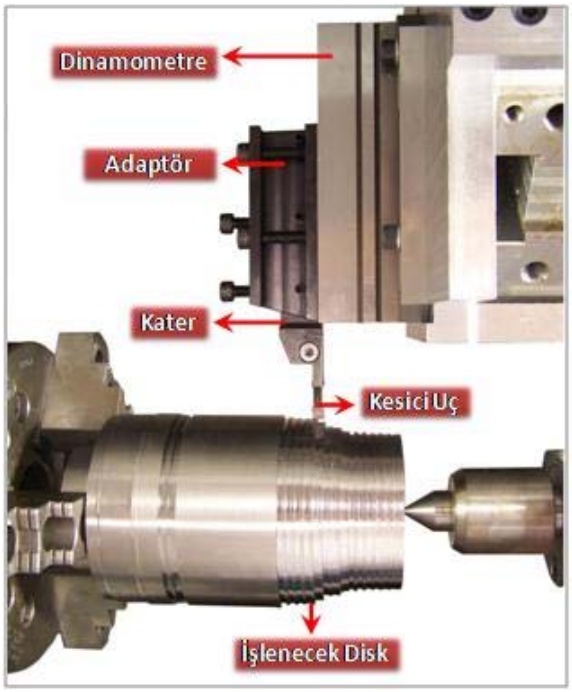
Plazma borlanmış kesici uçlardan bileşke kesme kuvveti testlerinde iyi sonucu veren uçlardan 3, 4, 7, 9, 14 ve 15 numaralı uçlar ile borlanmamış uca ortogonal kesme deneyleri yapılarak talaş oranı, sürtünme açısı ve katsayısı, bileşke ortogonal kesme kuvveti, kayma açısı, kayma gerilmesi, kesme katsayıları gibi değişkenlerin hesaplaması yapılmıştır.

Bölüm 1.4'de anlatılan ortogonal kesme teorisi çerçevesinde kesme testleri Koç Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü MARC'da bulunan Mazak QUICK TURN NEXUS 150 CNC torna tezgahı (Şekil 2.21) ile General Electric firmasından temin edilen Ti-6Al-4V malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.22'de

gösterilen Ti-6Al-4V iş parçası üzerinde 1.2 mm kalınlığında (w) diskler açılarak 70 m/dk kesme hızında ve 0.2, 0.275 ve 0.35 mm/dev. ilerleme hızlarında (t_0) 0, 3, 4, 7, 9, 14 ve 15 numaralı kesici uçlara ortogonal kesme testleri uygulanmıştır. Kesici uçları bağlamak üzere talaş açısı $\alpha=6^o$ olacak şekilde özel olarak bir kater imal ettirilmiştir. Ortogonal kesme testleri esnasında oluşan F_c kesme kuvveti ve F_t teğetsel kuvvet, Şekil 2.22'de belirtilen Kistler Dinamometresi (Model 9257B) ile ölçülmüştür.



Şekil 2.21 : Mazak NEXUS 150 CNC torna tezgahı ve dinamometre.



Şekil 2.22 : Ortogonal testlerin yapıldığı iş parçası ve dinamometre.

2.4.4 Aşınma testleri

Plazma borlanmış kesici uçların takım ömrüne etkisini belirlemek amacıyla kesme kuvveti değerleri borlanmamış numuneye göre daha iyi çıkan 4, 7, 9 ve 13 numaralı kesici uçlar, Ti-6Al-4V malzeme üzerinde alın frezeleme ile aşınma testlerine tabi tutulmuştur.

Aşınma testleri kesme parametreleri olarak ortogonal kesme testlerinde olduğu gibi 70 m/dk kesme hızı alınmış, ayrıca kesme derinliği (paso) 0.2 mm ve ilerleme de 0.2 mm/diş(kesici uç) alınarak üç eksenli Mazak FJV-200 UHS CNC İşleme Merkezinde yapılmıştır. 0, 4, 7, 9 ve 13 numaralı kesici uçlar Şekil 2.14'de belirtilen alın freze takımına aynı anda bağlanmış ve testlere başladıktan sonra değişik sürelerde durdurularak kesici uçlar optik mikroskop ile incelenmiştir. Talaş ve serbest yüzeyleri incelenmiş ve talaş yüzeyinde oluşan aşınma alanı ile maksimum serbest yüzey aşınması (VB) ölçülmüştür.

2.4.5 XRD ölçümleri

Plazma borlanmış WC kesici uçlara yukarıda detaylı bir şekilde açıklanan talaş kaldırma deneylerinin ardından takımlarda ortaya çıkan bu iyileşmelerin sebebini ortaya çıkarmak amacıyla X-Işını Difraksiyon (X-Ray Diffraction-XRD) spektroskopisi ölçümleri de yapılmıştır. XRD ölçümleri ile plazma borlama sonrasında WC kesici takımların yüzeyinde oluşan bileşikler incelenmiştir.

Aşınma testleri yapılan plazma borlanmış 4, 7, 9, 13 ve 14 numaralı kesici uçlara XRD ölçümleri yapılarak yüzeyden oluşan bileşikler tespit edilmiştir. XRD ölçümleri Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi'nde bulunan Panalytical X'Pert PRO XRD cihazı (Şekil 2.23) ile yapılmıştır.



Şekil 2.23 : Panalytical X'Pert PRO XRD cihazı.

2.5 SEM Ölçümleri

XRD ölçümlerinin ardından bor penetrasyonunu tespit etmek amacıyla 9 numaralı numune ile 0 numaralı numununenin Taramalı Elektron Mikrokobu (Scanning Electron Microscope-SEM) ölçümleri de yapılmıştır. SEM ölçümleri İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi'nde bulunan ve Şekil 2.24'de gösterilen Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) (Model:JEOL JSM 7000F) ile yapılmıştır.



Şekil 2.24 : Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu.

2.5.1 Mikrosertlik ölçümleri

WC kesici uçlara plazma borlama sonrasında yapılan talaş kaldırma testleri ile XRD ve SEM ölçümlerinden sonra kesici takımların önemli özelliklerinden olan mikrosertlik değerlerindeki değişmi belirleyebilmek amacıyla Vickers mikrosertlik ölçümleri de yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi'nde bulunan Shimadzu HMV-2L mikrosertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır (Şekil 2.25).



Şekil 2.25 : Shimadzu HMV-2L mikrosertlik ölçüm cihazı.

3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

3.1 Deney Sonuçları

3.1.1 Kesme kuvveti ölçüm sonuçları

Bölüm 2'de belirtilen kesme şartlarında soğutma sıvısı kullanılmadan yapılan ölçümler sonucunda herbir numune için elde edilen X, Y ve Z eksenlerindeki kuvvetler veri toplama cihazı vasıtasıyla alınarak bir MATLAB programında değerlendirilmiş ve maksimum kuvvetlerin bileşkeleri elde edilerek Çizelge 3.1'de verilen sonuçlar bulunmuştur.

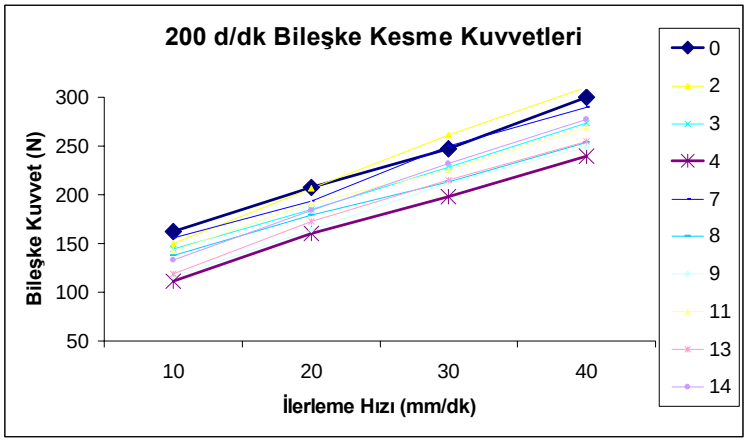
Çizelge 3.1 : Maksimum bileşke kesme kuvvetleri.

Num. Nu.	Devir Sayısı (d/dk)															
	200				350				500				650			
	İlerleme Hızı (mm/dk)															
	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
	Maksimum Bileşke Kesme Kuvveti (N)															
0	162	208	248	300	156	192	214	241	110	146	163	186	102	128	148	170
1	156	219	263	310	156	200	217	265	125	172	205	215	104	144	159	188
2	150	206	261	310	130	161	194	220	103	133	156	171	100	120	137	159
3	144	185	229	274	155	193	218	237	143	159	182	196	122	143	164	176
4	111	160	198	240	106	137	158	180	85	109	125	152	90	115	132	150
5	134	181	230	314	113	151	175	240	101	124	139	166	88	106	124	152
6	118	177	230	288	124	157	181	211	103	142	153	172	103	136	160	178
7	156	193	250	289	111	136	161	179	90	113	129	143	96	126	147	164
8	137	179	213	254	123	153	177	213	90	117	140	163	95	123	147	164
9	116	164	212	249	111	143	171	197	95	128	139	161	84	111	132	150
10	181	211	262	309	151	162	208	226	122	130	164	184	113	145	169	182
11	143	191	225	269	163	180	210	247	138	164	182	203	126	167	193	207
12	142	184	241	295	160	190	218	240	109	145	169	185	169	201	232	253
13	119	172	215	255	109	146	177	201	94	126	153	171	92	108	113	155
14	133	184	232	277	123	166	194	211	102	135	158	175	111	139	156	159
15	144	207	235	276	159	206	243	264	128	167	189	206	116	184	204	222
16	151	185	231	282	134	158	176	201	118	130	145	165	130	143	175	194

Çizelge 3.1'de verilen bileşke kesme kuvveti ölçümlerini daha iyi analiz edebilmek amacıyla değişik parameterelere bağlı grafiklerin incelenmesi uygun olacaktır.

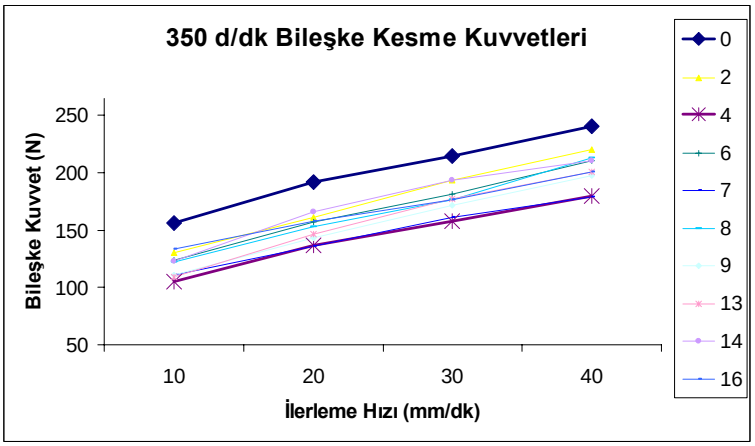
Bunun için öncelikle sabit devir sayılarında, değişik ilerleme hızlarında (10, 20, 30, 40 mm/dk) oluşan kesme kuvvetleri incelenmiştir.

Şekil 3.1'de 200 d/dk'da plazma borlanmamış numuneye göre (0 numaralı numune) daha düşük bileşke kesme kuvveti veren kesici uçlarda değişik ilerleme hızlarına göre bileşke kesme kuvveti değişim grafiği verilmiştir. Bu grafikten de görüldüğü üzere 4 numaralı numune (600 ^{o}C, 6 saat borlanmış) borlanmamış numuneye göre en düşük kesme kuvveti değerlerini vermiştir. Burada 2 numaralı numunenin (600 ^{o}C, 2 saat borlanmış) borlanmamış numuneye göre 30 ve 40 mm/dk ilerlemelerde daha büyük kesme kuvveti oluşturduğu görülmüştür.



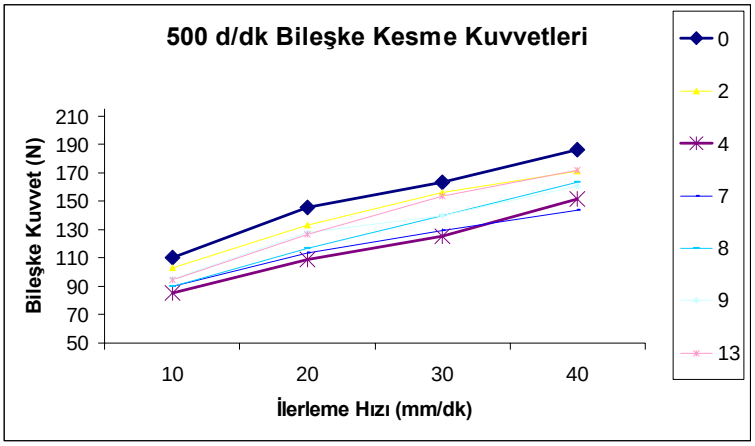
Şekil 3.1 : 200 d/dk'da bileşke kesme kuvvetleri.

Şekil 3.2'de 350 d/dk'da plazma borlanmamış numuneye göre (0 numaralı numune) daha düşük bileşke kesme kuvveti veren kesici uçlarda değişik ilerleme hızlarına göre bileşke kesme kuvveti değişim grafiği verilmiştir. 350 d/dk'da yapılan ölçümde yaklaşık olarak 4 ve 7 numaralı numunenin borlanmamış numuneye göre en düşük kesme kuvveti değerlerini verdiği görülmüştür.



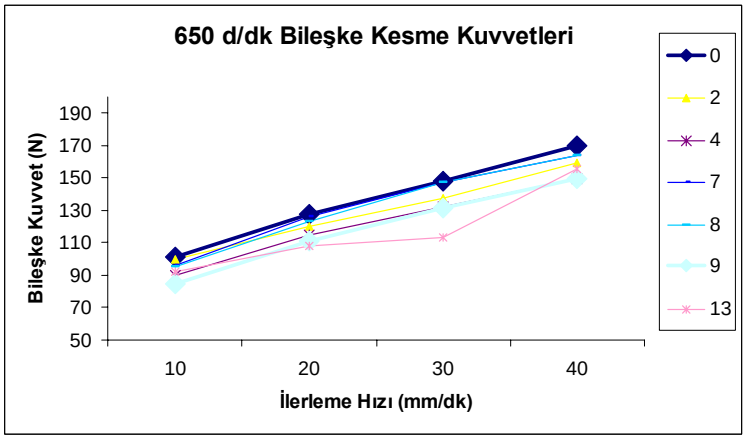
Şekil 3.2 : 350 d/dk'da bileşke kesme kuvvetleri.

Şekil 3.3'de 500 d/dk'da plazma borlanmamış numuneye göre daha düşük bileşke kesme kuvveti veren kesici uçlarda değişik ilerleme hızlarına göre bileşke kesme kuvveti değişim grafiği verilmiştir. 500 d/dk'da yapılan ölçümde 10, 20 ve 30 mm/dk ilerleme hızlarında 4 numaralı numunenin, 40 mm/dk ilerleme hızında da 7 numaralı numunenin borlanmamış numuneye göre en düşük kesme kuvveti değerini verdiği görülmüştür.



Şekil 3.3 : 500 d/dk'da bileşke kesme kuvvetleri.

Şekil 3.4'de 650 d/dk'da plazma borlanmamış numuneye göre daha düşük bileşke kesme kuvveti veren kesici uçlarda değişik ilerleme hızlarına göre bileşke kesme kuvveti değişim grafiği verilmiştir. 650 d/dk'da yapılan ölçümde ise 9 ve 13 numaralı numunelerin borlanmamış numuneye göre en düşük kesme kuvveti değerini verdiği görülmüştür.

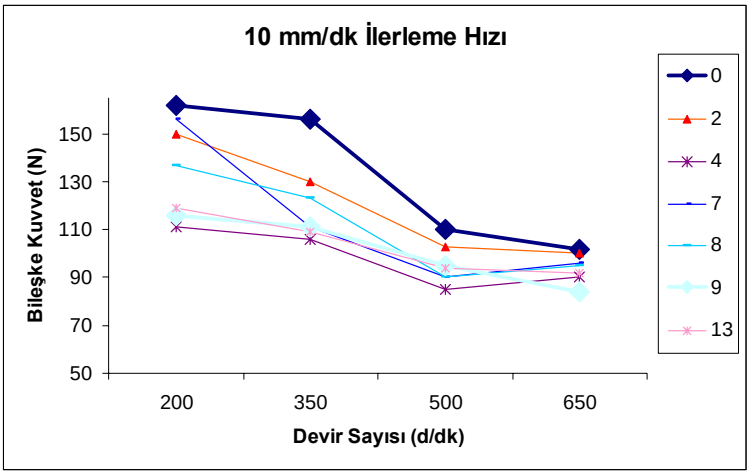


Şekil 3.4 : 650 d/dk'da bileşke kesme kuvvetleri.

Çizelge 3.1'de verilen bileşke kesme kuvvetleri ve yukarıda verilen grafikler incelendiğinde; 2, 4, 7, 8, 9 ve 13 numaralı numunelerin 0 numaralı borlanmamış numuneye göre tüm devir sayılarında düşük kuvvet değerleri verdiği görülmektedir.

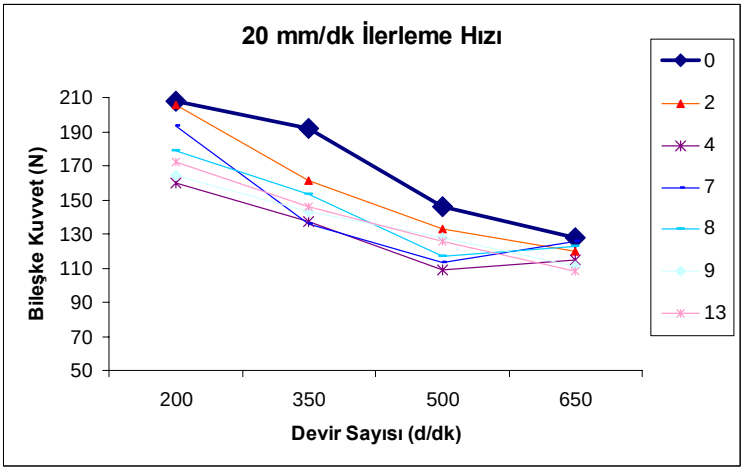
Bu numunelerin sabit ilerleme hızlarında ve değişik devir sayılarında oluşturduğu grafikler incelendiğinde ise aşağıda verilen sonuçlar görülmüştür.

Şekil 3.5'de 10 mm/dk ilerleme hızında ve değişik devir sayılarında ortaya çıkan bileşke kesme kuvvetleri görülmektedir. Düşük devir sayılarında 4 numaralı numune daha iyi sonuç verirken yüksek devir sayısında 9 numaralı numenin en iyi sonucu verdiği görülmektedir.



Şekil 3.5 : 10 mm/dk ilerleme hızında bileşke kesme kuvvetleri.

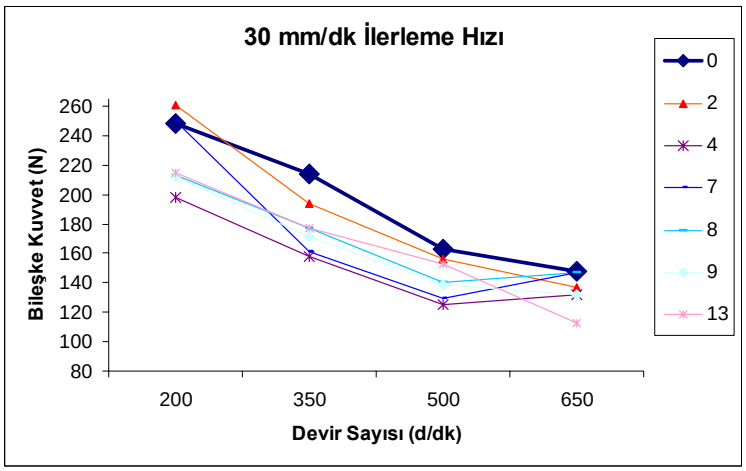
Şekil 3.6'da 20 mm/dk ilerleme hızında ve değişik devir sayılarında ortaya çıkan bileşke kesme kuvvetleri görülmektedir. Düşük devir sayılarında 4 numaralı numune daha iyi sonuç verirken 650 d/dk devir sayısında 13 numaralı numenin en iyi sonucu verdiği görülmektedir.



Şekil 3.6 : 20 mm/dk ilerleme hızında bileşke kesme kuvvetleri.

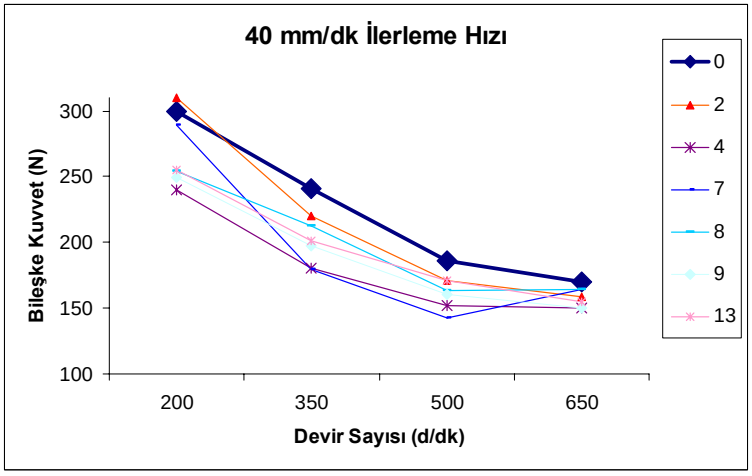
Şekil 3.7'de 30 mm/dk ilerleme hızında ve değişik devir sayılarında ortaya çıkan bileşke kesme kuvvetleri görülmektedir. Bu ilerleme hızında da düşük devir

sayılarında 4 numaralı numune daha iyi sonuç verirken 650 d/dk devir sayısında 13 numaralı numenin en iyi sonucu verdiği görülmektedir.



Şekil 3.7 : 30 mm/dk ilerleme hızında bileşke kesme kuvvetleri.

Şekil 3.8'de 40 mm/dk ilerleme hızında ve değişik devir sayılarında ortaya çıkan bileşke kesme kuvvetleri görülmektedir. Bu ilerleme hızında 200 ve 650 d/dk devir sayılarında 4 numaralı numune daha iyi sonuç verirken 350 ve 500 d/dk devir sayılarında 7 numaralı numenin en iyi sonucu verdiği görülmektedir.

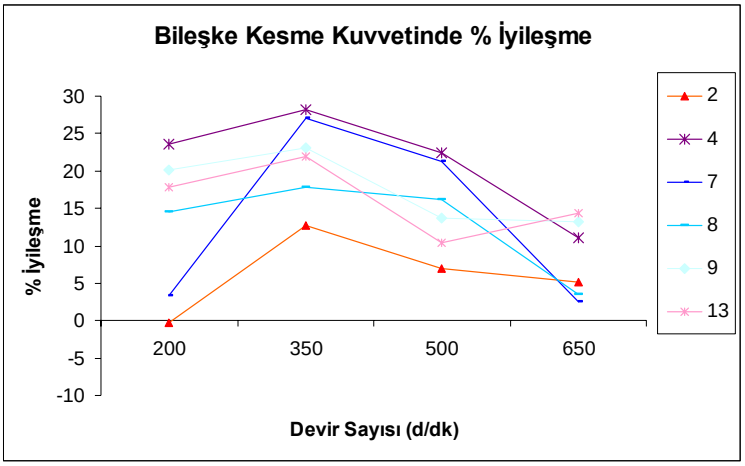


Şekil 3.8 : 40 mm/dk ilerleme hızında bileşke kesme kuvvetleri.

2, 4, 7, 8, 9 ve 13 numaralı kesici uçların borlanmamış numuneye göre bileşke kesme kuvvetlerinde sağladığı tüm ilerlemelere göre ortalama yüzde iyileşme hesaplandığında Çizelge 3.2'deki sonuçlar elde edilmektedir. Bu çizelgedeki değerlerin grafik olarak gösterilişi ise Şekil 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Bileşke kesme kuvvetindeki % iyileşmeler.

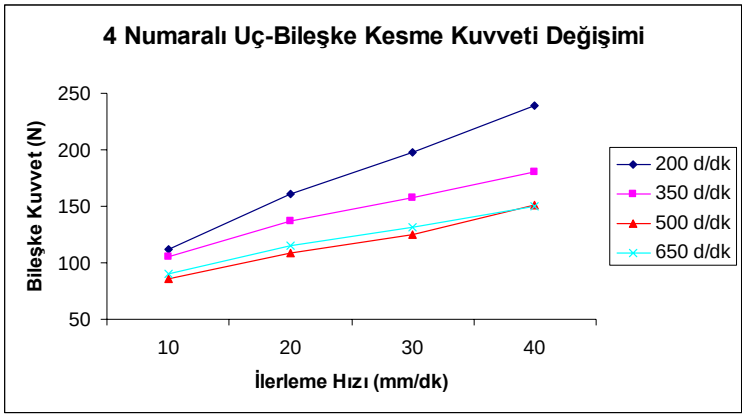
Numune Nu.	% İyileşme				
	200 d/dk	350 d/dk	500 d/dk	650 d/dk	Ortalama
2	-0,28	12,65	7	5,21	6,15
4	23,55	28,12	22,5	11,08	21,31
7	3,32	27,1	21,22	2,56	13,55
8	14,52	17,74	16,24	3,44	12,99
9	20,13	23,07	13,7	13,24	17,54
13	17,89	21,88	10,49	14,32	16,15
Ortalama	13,19	21,76	15,19	8,31	14,61



Şekil 3.9 : Bileşke kesme kuvvetindeki % iyileşmeler.

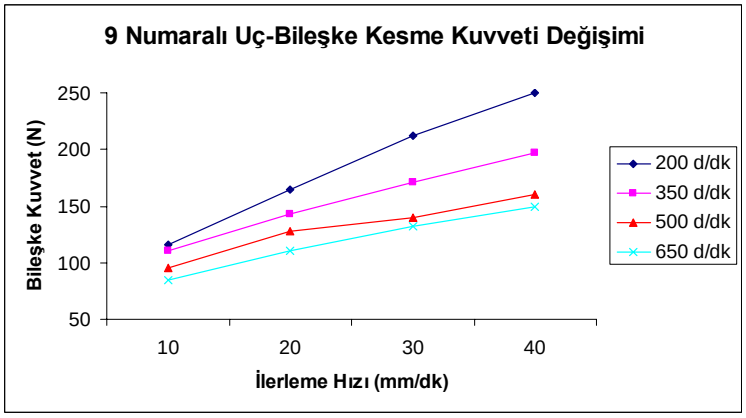
Bu grafikten de görüleceği üzere 200, 350 ve 500 d/dk devir sayılarında 4 numaralı kesici ucun, 650 d/dk devir sayısında ise 13 numaralı ucun bileşke kesme kuvvetinde en yüksek iyileşmeyi sağladığı görülmektedir. 250 ve 500 d/dk devir sayılarında en düşük iyileşme ise 2 numaralı kesici uçta meydana gelmekte, 200 d/dk devir saysında ise 2 numaralı uçta kesme kuvvetinin arttığı görülmektedir. 650 d/dk devir sayısında en düşük iyileşme 7 numaralı uçta meydana gelmektedir. Çizelge 3.2'de verildiği üzere 350 d/dk ile işleme durumunda 4, 7, 8, 9 ve 13 numaralı uçlar için ortalama yüzde iyileşmenin %21,76 olduğu görülmüştür. Dolayısıyla değişik parametrelerde yapılan borlamalarda 350 d/dk ile işlenmesi durumunda bileşke kuvvette ortaya çıkacak olan yüzde iyileşmenin en iyi değerde olacağı görülmektedir. Bu devir sayısında 4 numaralı uçta %28,12 değerinde daha düşük bileşke kesme kuvveti oluştuğu görülmüştür. Kesici uçların tüm devir sayılarındaki ortalama iyileşmelerine bakıldığında ise en iyi iyleşmeyi %21,31 ile 4 numaralı ucun sağladığı, ikinci olarak ise %17,54 ile 9 numaralı ucun geldiği görülmektedir.

Yukarıda yapılan incelemeler sonucunda 4 ve 9 numaralı kesici ucun en iyi kesme şartlarını sağladığı görülmüştür. 4 numaralı uç için ilerme hızı ve devir sayılarına göre oluşan bileşke kuvvet değerlerini incelediğimizde Şekil 3.10'daki grafik ortaya çıkmaktadır. Burada da görüldüğü üzere kesme kuvvetini minimum seviyede tutmak için her ilerleme değerinde 500 d/dk'da işlemek uygun olacaktır.



Şekil 3.10 : 4 Numaralı kesici uç bileşke kuvvet değişimi.

9 numaralı kesici uç için de aynı incelemeyi yaptığımızda Şekil 3.11'deki grafik elde edilmektedir. Bu uç için ise kesme kuvvetini minimum seviyede tutmak için 650 d/dk'da işlemenin uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 3.11 : 9 Numaralı kesici uç bileşke kuvvet değişimi.

Yukarıda yapılan değerlendirmeler sonucunda 200, 350 ve 500 d/dk devir sayılarında 4 numaralı ucun, yani 600 ^{o}C'de 6 saat süreyle plazma borlanmış olan ucun bileşke kesme kuvvetinde en iyi iyileşmeyi sağladığı; 650 d/dk devir sayısında ise yani yüksek kesme hızında (V= 163,36 m/dk) 9 numaralı ucun, yani 800 ^{o}C'de 1 saat süreyle plazma borlanmış olan ucun en yüksek iyileşmeyi sağladığı görülmektedir.

Bileşke kuvvetlerde ortaya çıkan iyileşmelerin kesici uç kenar radyüsü ile ilgili olup olmadığını belirlemek amacyla kesici uçların kenar radyüsleri de ölçülmüş ve Çizelge 3.3'de verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere tüm kesici uçlarda kenar radyüsü 45-57 μm aralığında değişmektedir. Dolayısıyla bileşke kuvvetlerde ortaya çıkan iyileşmenin kesici uç kenar radyüsündeki değişimle bir ilgisinin olmadığı belirlenmiştir.

Çizelge 3.3 : Kesici uç kenar yarıçap değerleri.

Numune Nu.	Kenar yarıçapı (μm)
0	54,96
1	52,02
2	58,45
3	45,93
4	50,87
5	53,48
6	48,66
7	55,02
8	45,64
9	51,06
10	52,81
11	46,9
12	53,93
13	45
14	47,59
15	57,63
16	54,08

3.1.2 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları

0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 11 ve 15 numaralı kesici uçlar ile yapılan frezeleme işlemi sonucunda oluşan R_a yüzey pürüzlülüğü değerleri Çizelge 3.4'de, R_z yüzey pürüzlülüğü değerleri Çizelge 3.5'de, R_q yüzey pürüzlülüğü değerleri ise Çizelge 3.6'da görülmektedir.

Çizelge 3.4 : Yüzey pürüzlülüğü R_a (µm).

Num. Nu.	Devir Sayısı (d/dk)															
	200				350				500				650			
	İlerleme Hızı (mm/dk)															
	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
	Yüzey Pürüzlülüğü R_a (µm))															
0	0,2	0,15	0,31	0,15	0,16	0,18	0,11	0,11	0,12	0,12	0,15	0,2	0,15	0,13	0,13	0,12
1	0,17	0,15	0,12	0,22	0,18	0,15	0,17	0,15	0,13	0,15	0,22	0,15	0,17	0,13	0,15	0,14
2	0,15	0,12	0,13	0,14	0,1	0,13	0,11	0,13	0,14	0,13	0,15	0,16	0,13	0,16	0,16	0,11
3	0,11	0,12	0,13	0,17	0,13	0,16	0,1	0,18	0,12	0,12	0,13	0,18	0,15	0,12	0,15	0,15
4	0,25	0,21	0,21	0,22	0,18	0,13	0,19	0,24	0,23	0,13	0,16	0,21	0,09	0,14	0,18	0,12
5	0,13	0,14	0,14	0,19	0,14	0,12	0,17	0,16	0,12	0,13	0,18	0,16	0,16	0,1	0,14	0,15
7	0,12	0,21	0,18	0,14	0,1	0,11	0,2	0,23	0,13	0,21	0,27	0,32	0,14	0,13	0,12	0,133
8	0,23	0,11	0,14	0,18	0,26	0,15	0,16	0,24	0,09	0,11	0,14	0,15	0,19	0,16	0,21	0,12
11	0,15	0,22	0,22	0,18	0,2	0,14	0,18	0,14	0,13	0,2	0,12	0,13	0,11	0,2	0,22	0,11
15	0,1	0,13	0,13	0,13	0,11	0,12	0,12	0,11	0,13	0,12	0,12	0,13	0,17	0,15	0,21	0,22

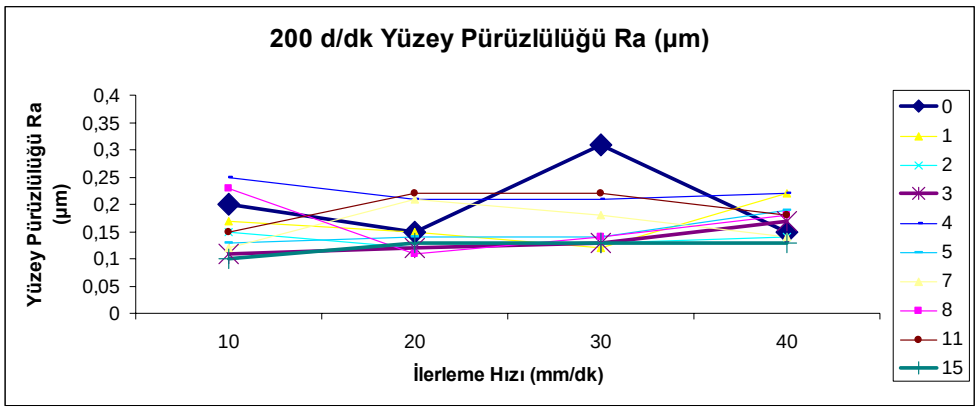
Çizelge 3.5 : Yüzey pürüzlülüğü R_z (µm).

Num. Nu.	Devir Sayısı (d/dk)															
	200				350				500				650			
	İlerleme Hızı (mm/dk)															
	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
	Yüzey Pürüzlülüğü R_z (µm))															
0	1,06	0,89	1,74	0,89	1,03	1,23	0,74	0,78	0,68	1	0,98	1,35	0,96	0,79	0,81	0,83
1	1,03	1,02	0,77	1,45	0,98	0,92	1,07	1	0,84	0,89	1,23	1,05	0,99	1,02	1,01	0,93
2	0,9	0,91	0,82	0,93	0,62	1,03	0,68	0,96	0,83	0,87	0,91	0,96	1	0,88	0,89	0,75
3	1,05	0,74	0,84	0,98	0,85	1,09	0,76	1,06	0,76	0,77	0,8	1,05	1,31	1,05	1	1,27
4	1,47	1,15	1,09	1,4	0,99	0,95	1,14	1,52	1,3	0,88	1,05	0,34	0,77	0,78	1,28	0,73
5	0,87	0,96	1,02	1,08	0,97	0,82	1,24	1,16	0,72	0,82	1,19	0,98	0,86	0,62	0,79	0,89
7	0,96	1,42	1,14	0,86	0,94	0,74	1,06	1,45	0,97	1,39	1,29	1,95	1,18	0,85	0,82	0,99
8	1,26	0,68	1,05	1,07	1,52	0,84	0,95	1,39	0,66	0,79	0,91	0,82	1,24	1,03	1,15	0,8
11	0,98	1,73	2,37	1,7	1,57	1,06	1,04	0,83	0,72	1,17	0,76	0,84	0,75	1,48	1,49	0,75
15	0,76	0,85	0,85	0,83	0,87	0,86	0,79	0,75	0,94	1,05	1,05	0,98	1,18	0,99	1,82	2,05

Çizelge 3.6 : Yüzey pürüzlülüğü R_q (µm).

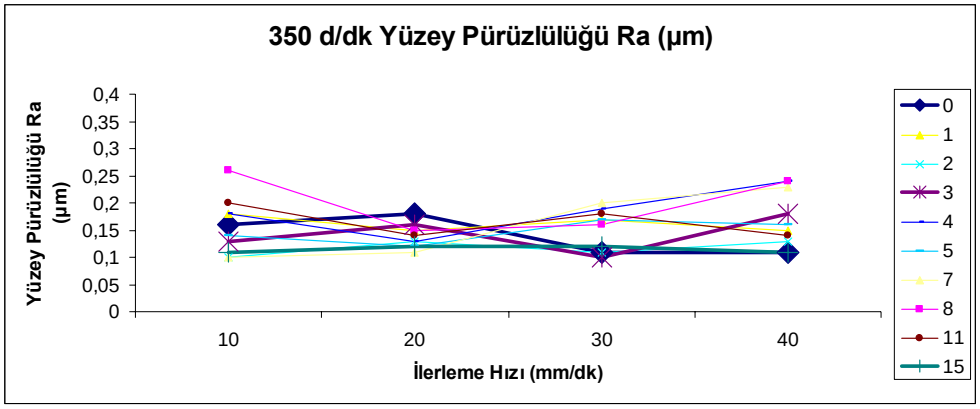
Num. Nu.	Devir Sayısı (d/dk)															
	200				350				500				650			
	İlerleme Hızı (mm/dk)															
	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
	Yüzey Pürüzlülüğü R_a (µm))															
0	0,25	0,19	0,42	0,19	0,2	0,24	0,14	0,14	0,15	0,16	0,19	0,25	0,19	0,17	0,16	0,15
1	0,21	0,19	0,16	0,29	0,18	0,19	0,21	0,19	0,16	0,19	0,29	0,19	0,22	0,17	0,19	0,17
2	0,19	0,15	0,16	0,17	0,12	0,17	0,13	0,16	0,17	0,16	0,2	0,2	0,17	0,19	0,2	0,14
3	0,16	0,14	0,17	0,21	0,16	0,2	0,13	0,23	0,15	0,15	0,16	0,23	0,21	0,15	0,19	0,2
4	0,34	0,25	0,25	0,28	0,22	0,17	0,23	0,3	0,32	0,16	0,21	0,27	0,12	0,17	0,25	0,15
5	0,16	0,18	0,18	0,23	0,18	0,15	0,23	0,2	0,15	0,16	0,23	0,2	0,2	0,12	0,17	0,18
7	0,15	0,28	0,22	0,17	0,14	0,14	0,23	0,29	0,17	0,28	0,31	0,39	0,19	0,16	0,15	0,17
8	0,29	0,13	0,19	0,22	0,37	0,18	0,2	0,29	0,12	0,14	0,18	0,18	0,26	0,2	0,27	0,15
11	0,18	0,28	0,32	0,25	0,26	0,19	0,22	0,18	0,16	0,25	0,15	0,17	0,14	0,26	0,29	0,14
15	0,13	0,16	0,16	0,16	0,14	0,16	0,15	0,14	0,16	0,17	0,17	0,17	0,22	0,18	0,27	0,29

İş parçasının 200 d/dk devir ile işlenmesi durumunda iş parçası yüzeyinde oluşan R_a yüzey pürüzlülüğü değerleri grafik olarak Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Burada 15 numaralı ucun yüzey pürüzlülük değerinin en düşük seviyede olduğu görülmektedir. Kesme kuvveti açsından en iyi uçlardan biri olan 4 numaralı ucun ise ortalama olarak borlanmamış uç ile benzer yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmektedir.



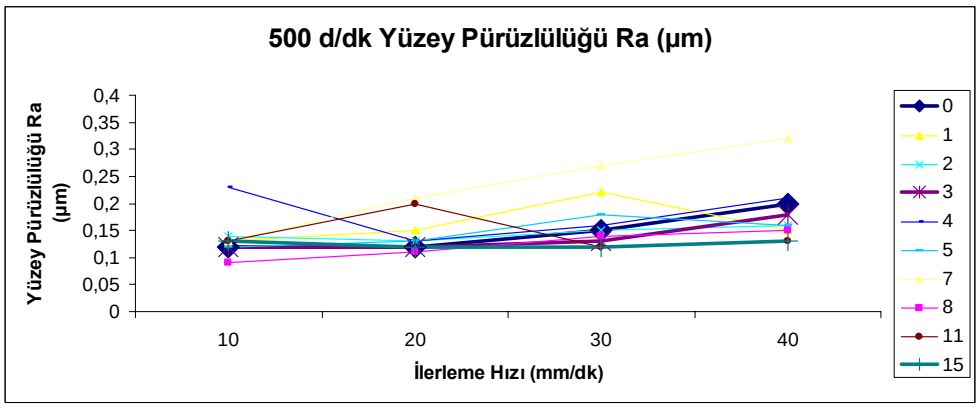
Şekil 3.12 : 200 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_a değeri.

İş parçasının 350 d/dk devir ile işlenmesi durumunda iş parçası yüzeyinde oluşan R_a yüzey pürüzlülüğü değerleri grafik olarak Şekil 3.13'de gösterilmiştir. Burada da 4 numaralı ucun yine ortalama olarak borlanmamış uç ile benzer yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmektedir.



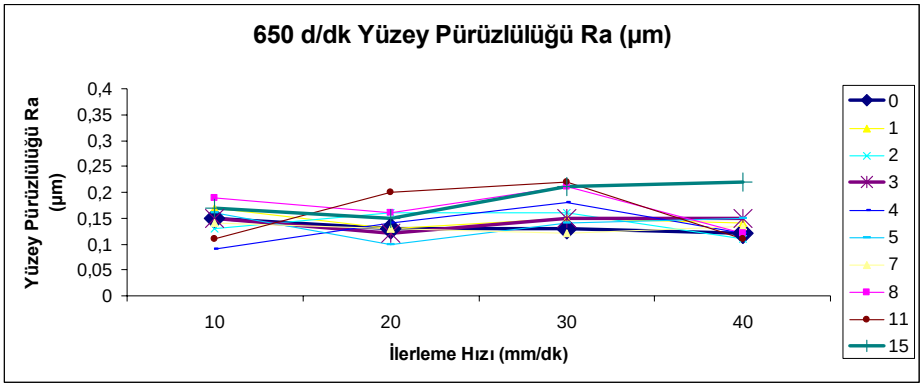
Şekil 3.13 : 350 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_a değeri.

İş parçasının 500 d/dk devir ile işlenmesi durumunda iş parçası yüzeyinde oluşan R_a yüzey pürüzlülüğü değerleri grafik olarak Şekil 3.14'de gösterilmiştir. Burada 7 numaralı ucun en kötü yüzey pürüzlülük değeri verdiği, 15 numaralı ucun en düşük yüzey pürüzlülük değeri verdiği ve 4 numaralı ucun ise yine ortalama olarak borlanmamış uç ile benzer yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmektedir.



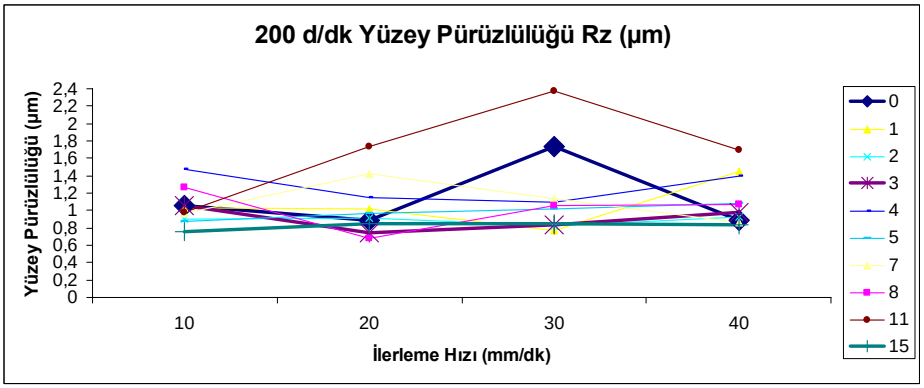
Şekil 3.14 : 500 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_a değeri.

İş parçasının 650 d/dk devir ile işlenmesi durumunda iş parçası yüzeyinde oluşan R_a yüzey pürüzlülüğü değerleri grafik olarak Şekil 3.15'de gösterilmiştir. Burada da 4 numaralı ucun yine ortalama olarak borlanmamış uç ile benzer yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmektedir.



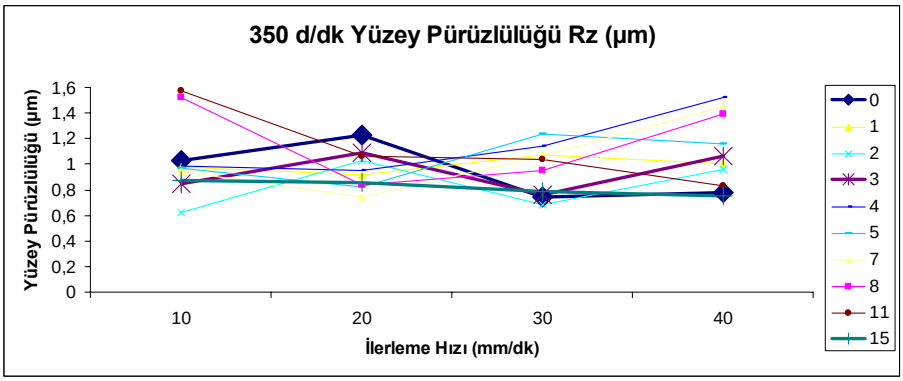
Şekil 3.15 : 650 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_a değeri.

Benzer şekilde 200 d/dk'da R_z yüzey pürüzlülük değeri grafik olarak Şekil 3.16'da görülmektedir. Burada 11 numaralı ucun yüzey pürüzlülük değerinin en kötü olduğu görülmektedir. 4 numaralı ucun ise yine 0 numaralı uç ile ortalama yakın değerlerde olduğu görülmektedir.



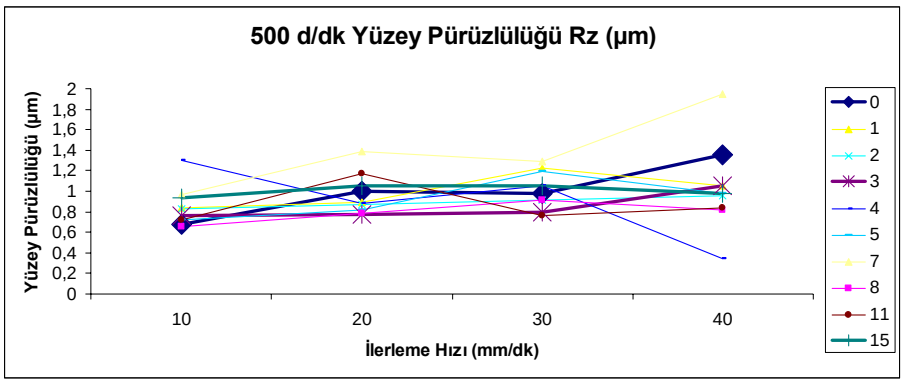
Şekil 3.16 : 200 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_z değeri.

350 d/dk'da R_z yüzey pürüzlülük değeri grafik olarak Şekil 3.17'de görülmektedir. 4 numaralı ucun yine 0 numaralı uç ile ortalama yakın değerlerde olduğu görülmektedir.



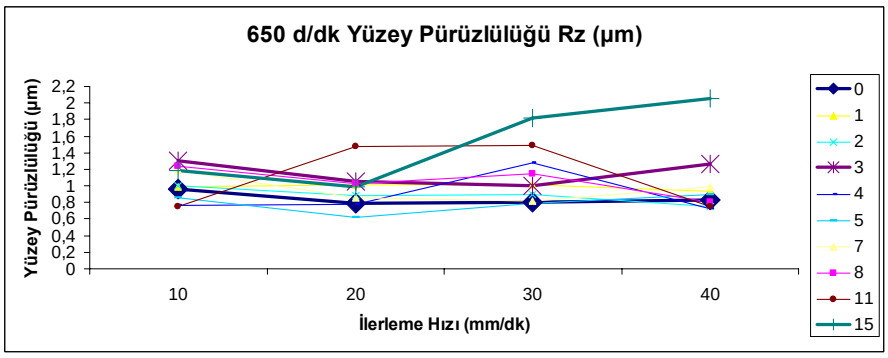
Şekil 3.17 : 350 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_z değeri.

500 d/dk'da R_z yüzey pürüzlülük değeri grafik olarak Şekil 3.18'de görülmektedir. Burada da 4 numaralı ucun yine 0 numaralı uç ile ortalama yakın değerlerde olduğu görülmektedir.



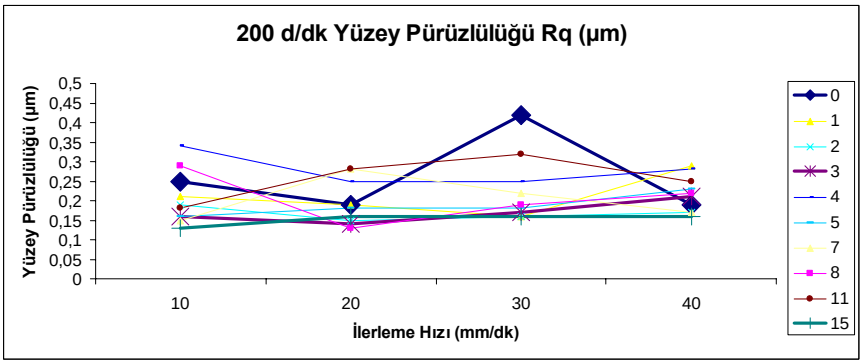
Şekil 3.18 : 500 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_z değeri.

650 d/dk'da R_z yüzey pürüzlülük değeri grafik olarak Şekil 3.19'da görülmektedir. Burada bütün uçların yaklaşık olarak 0 numaralı uç ile ortalama yakın değerlerde veya biraz üstünde olduğu görülmektedir.



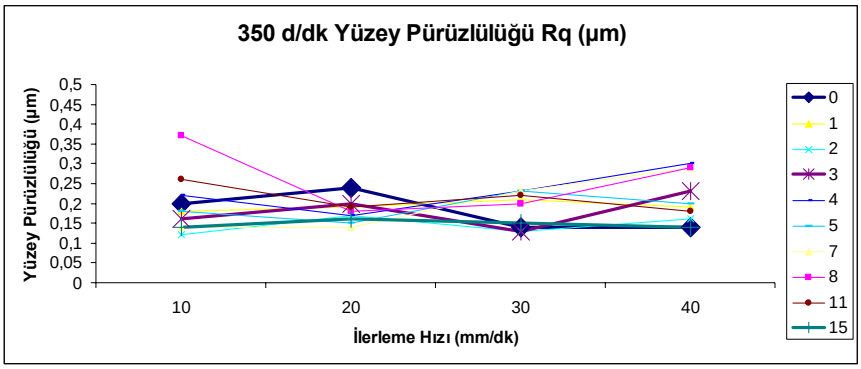
Şekil 3.19 : 650 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_z değeri.

200 d/dk devirde R_q yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 3.20'de görülmektedir. Ortalama olarak bütün uçların yakın değerlerde olduğu görülmektedir.



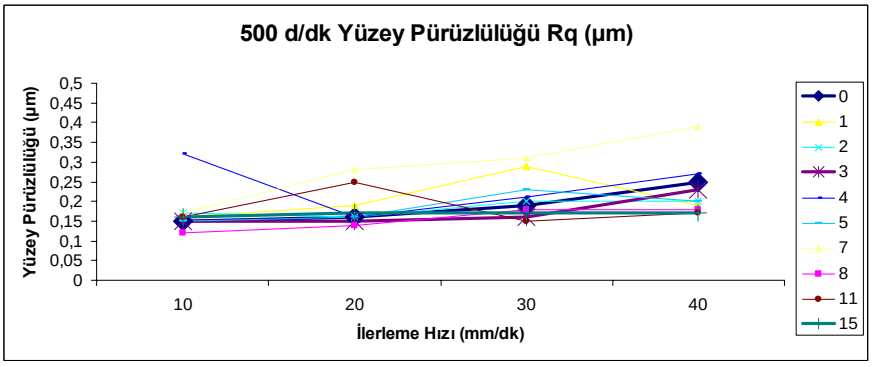
Şekil 3.20 : 200 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_q değeri.

350 d/dk devirde R_q yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 3.21'de görülmektedir. Ortalama olarak bütün uçların yine yakın değerlerde olduğu görülmektedir.



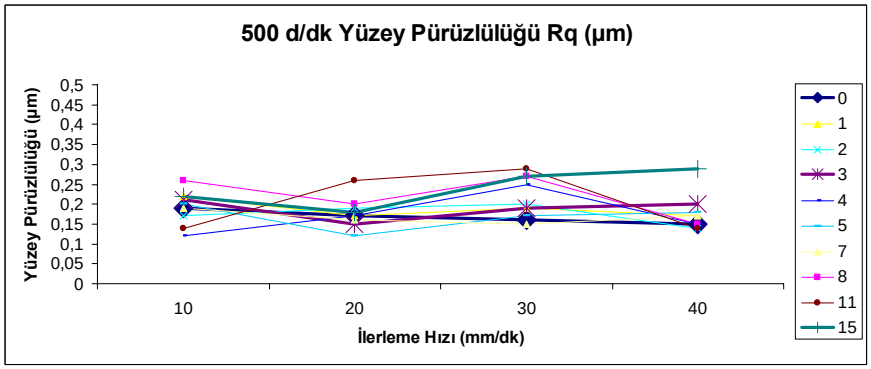
Şekil 3.21 : 350 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_q değeri.

500 d/dk devirde R_q yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 3.22'de görülmektedir. 1 ve 7 numaralı uç hariç olmak üzere ortalama olarak diğer uçların yüzey pürüzlülük değerlerinin yakın değerlerde olduğu görülmektedir.



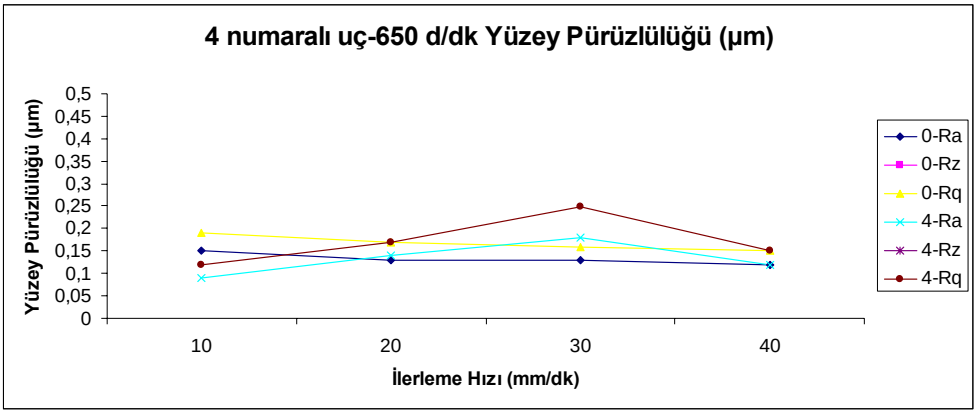
Şekil 3.22 : 500 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_q değeri.

650 d/dk devirde R_q yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 3.23'de görülmektedir. Burada da yine ortalama olarak bütün uçların yüzey pürüzlülük değerlerinin yakın değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.23 : 650 d/dk yüzey pürüzlülüğü R_q değeri.

Sonuç olarak bütün yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde plazma borlanmış ve borlanmamış numuneler arasında yüzey pürüzlülük değerlerinde çok belirgin bir farklılık olmadığı görülmektedir. Özellikle kesme kuvvetleri açısından en yüksek iyileşme sağlayan 4 numaralı ucun 650 d/dk devirde oluşturduğu yüzey prüzülülük değerlerinin borlanmamış numuneye göre olan değişimi Şekil 3.24'de görülmektedir.



Şekil 3.24 : 4 numaralı ucun 650 d/dk'da yüzey pürüzlülüğü değerleri.

Yukarıda incelenen kesme kuvveti ve yüzey prüzlülüğü analizlerine göre 4 numaralı ucun plazma borlanan uçlar içerisinde en düşük bileşke kesme kuvveti değeri verdiği ve iş parçası yüzeyinde oluşturduğu yüzey pürüzlülüğü değerinin de 0 numaralı uç ile ortalama olarak yakın değerlerde olduğu görülmüştür.

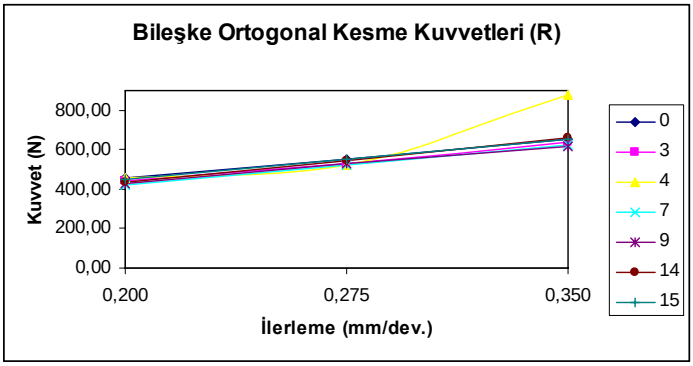
3.1.3 Ortogonal talaş kaldırmada kesme kuvveti ölçüm sonuçları

Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen F_c ve F_t değerleri ile talaş kalınlıkları, hesaplanan talaş oranı ve bileşke kesme kuvveti değerleri Çizelge 3.7'de gösterilmiştir. Buarada 0.2, 0.275 ve 0.35 mm/dev. değerlerindeki ilerleme miktarları aynı zamanda kesme derinliğini (t_0) de ifade etmektedir.

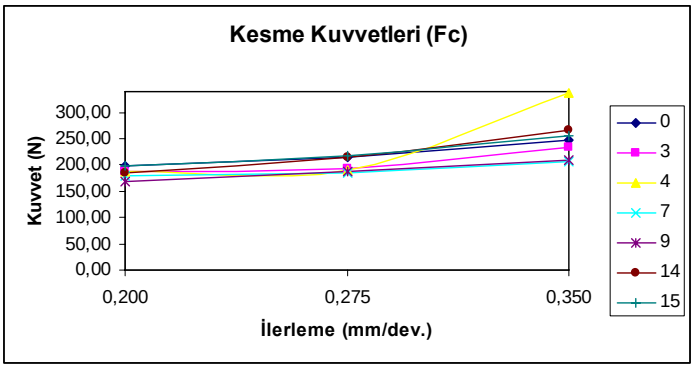
Bileşke ortogonal kuvvetlerin ilerleme miktarlarına göre değişmi Şekil 3.25'de verilmiştir. Dinamometreden ölçülen kesme kuvveti F_c ve teğetsel kuvvet F_t değişimleri de Şekil 3.26 ve Şekil 3.27'de gösterilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü üzere ortogonal kesme kuvvetlerinde tüm uçların benzer değişim gösterdiği görülmektedir. Talaş oranı (r) değişimi de Şekil 3.28'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7 : Ortogonal kesmede ölçülen talaş kalınlığı ve kuvvetler.

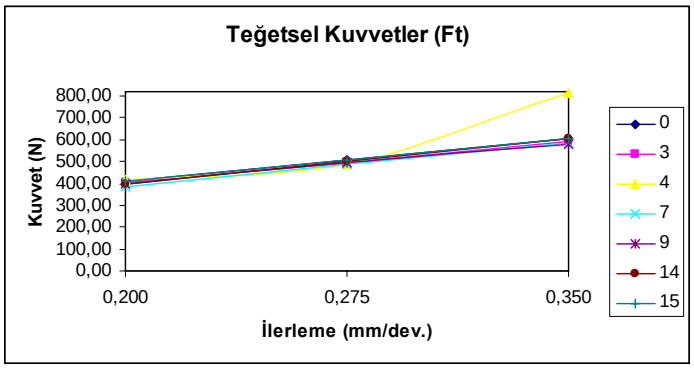
Num. Nu.	İlerleme (mm/dev.) (to)	Talaş Kalınlığı (mm) (tc)	Talaş Oranı (r)	Kesme Kuvveti (N) (Fc)	Teğetsel Kuvvet (N) (Ft)	Bileşke Kesme Kuvveti (N) (R)
0	0,200	0,172	1,164	198,45	410,15	455,64
	0,275	0,214	1,285	215,02	504,77	548,66
	0,350	0,233	1,501	246,97	605,59	654,01
3	0,200	0,167	1,197	188,48	403,13	445,01
	0,275	0,224	1,229	193,35	496,16	532,50
	0,350	0,260	1,345	234,19	593,73	638,24
4	0,200	0,177	1,131	186,99	414,66	454,88
	0,275	0,221	1,245	191,09	485,26	521,53
	0,350	0,388	1,288	336,59	812,26	879,24
7	0,200	0,165	1,209	179,08	383,51	423,26
	0,275	0,206	1,336	183,81	488,33	521,77
	0,350	0,273	1,281	207,54	587,59	623,16
9	0,200	0,165	1,209	167,76	395,22	429,35
	0,275	0,223	1,235	187,09	493,00	527,30
	0,350	0,271	1,293	209,67	580,65	617,34
14	0,200	0,173	1,159	184,70	395,85	436,82
	0,275	0,216	1,273	214,28	501,93	545,75
	0,350	0,252	1,388	265,63	604,11	659,93
15	0,200	0,172	1,160	199,06	407,08	453,14
	0,275	0,220	1,249	216,28	509,98	553,95
	0,350	0,276	1,266	254,44	603,70	655,13



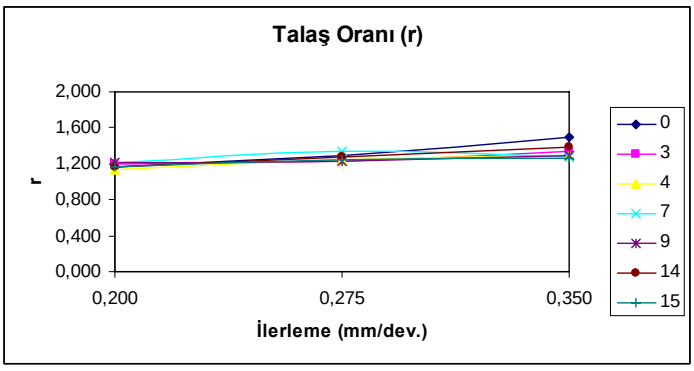
Şekil 3.25 : Bileşke ortogonal kesme kuvvetleri.



Şekil 3.26 : Dinamometreden alınan kesme kuvvetleri (Fc).



Şekil 3.27 : Dinamometreden alınan teğetsel kuvvetler (Ft).



Şekil 3.28 : Talaş oranı (r).

Dinamometre ile ölçülen Fc ve Ft kuvvet değerlerinden faydalanarak Bölüm 1.4'de belirtildiği şekilde Fce, Fte, Fcs ve Fts kuvvetleri ve denklem (1.24) kullanılarak Rs bileşke kuvveti elde edilmiş, ayrıca (1.22) ve (1.23) denklemleri kullanılarak kesme sabitleri (Ktc ve Kfc) ile kenar katsayıları (Kte ve Kfe) hesaplanmış ve bütün bu değerler Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8 : Hesaplanan kenar ve kayma kuvvetleri ile K katsayıları.

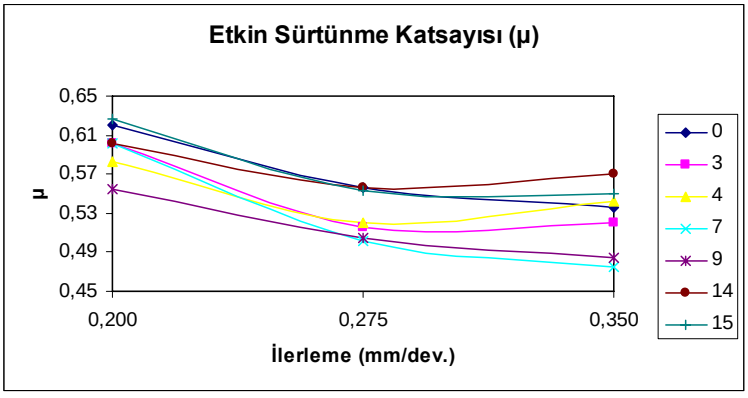
N.Nu	F_{ce} (N)	F_{te} (N)	F_{cs} (N)	F_{ts} (N)	R_s (N)	K_{tc} (N/mm^2)	Kte (N/mm)	K_{fc} (N/mm^2)	Kfe (N/mm)
0	131,19	148,53	67,26	261,62	270,13	1085,78	123,77	269,57	109,33
	131,19	148,53	83,83	356,24	365,97	1085,78	123,77	269,57	109,33
	131,19	148,53	115,78	457,06	471,50	1085,78	123,77	269,57	109,33
3	121,55	148,24	66,93	254,89	263,53	1058,89	123,53	253,92	101,29
	121,55	148,24	71,80	347,92	355,26	1058,89	123,53	253,92	101,29
	121,55	148,24	112,64	445,49	459,51	1058,89	123,53	253,92	101,29
4	65,06	130,40	121,93	284,26	309,31	1129,04	108,67	444,01	54,22
	65,06	130,40	126,03	354,86	376,58	1129,04	108,67	444,01	54,22
	65,06	130,40	271,53	681,86	733,93	1129,04	108,67	444,01	54,22
7	137,96	112,35	41,12	271,17	274,27	1133,73	93,62	158,13	114,97
	137,96	112,35	45,85	375,98	378,77	1133,73	93,62	158,13	114,97
	137,96	112,35	69,58	475,24	480,31	1133,73	93,62	158,13	114,97
9	111,35	149,67	56,42	245,55	251,95	1030,16	124,72	232,81	92,79
	111,35	149,67	75,74	343,33	351,58	1030,16	124,72	232,81	92,79
	111,35	149,67	98,32	430,98	442,05	1030,16	124,72	232,81	92,79
14	73,16	118,81	111,54	277,04	298,65	1157,02	99,01	449,62	60,97
	73,16	118,81	141,11	383,12	408,28	1157,02	99,01	449,62	60,97
	73,16	118,81	192,47	485,30	522,07	1157,02	99,01	449,62	60,97
15	121,72	146,45	77,34	260,63	271,87	1092,35	122,04	307,70	101,43
	121,72	146,45	94,56	363,53	375,63	1092,35	122,04	307,70	101,43
	121,72	146,45	132,73	457,26	476,13	1092,35	122,04	307,70	101,43

(1.26) ve (1.27) denklemleri ile hesaplanan etkin sürtünme açısı (β) ve kayma bölgesindeki kuvvetlerin etkisiyle oluşan sürtünme açısı (β_s) değerleri ile bu değerlerin tanjant değerlerinin alınmasıyla bulunan sürtünme katsayısı değerleri (μ ve μ_s) Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Etkin sürtünme katsayısı değerinin değişimi Şekil 3.29'da verilmiştir. Bu grafikten 3, 4, 7, 9 ve 14 numaralı uçlarda etkin sürtünme katsayısının borlanmamış sıfır numaralı uca göre daha düşük değerde olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısının borlanmamış uca göre düşük değerde olmasının sebebi yüzeyde oluşan bor bileşiklerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Çizelge 3.9 : Sürtünme açıları ve sürtünme katsayıları.

Numune Nu.	Kayma Bölgesi Sürtünme Açısı (derece) (β_s)	Etkin Sürtünme Açısı (derece) (β)	Sürtünme Katsayısı (μ_s)	Etkin Sürtünme Katsayısı (μ)	Ortalama Kayma Sürtünme Açısı (derece) (β_{sort})
0	20,42	31,82	0,37	0,62	19,96
	19,24	29,07	0,35	0,56	
	20,22	28,19	0,37	0,54	
3	20,71	31,06	0,38	0,60	19,52
	17,66	27,29	0,32	0,52	
	20,19	27,53	0,37	0,52	
4	29,22	30,27	0,56	0,58	27,49
	25,55	27,49	0,48	0,52	
	27,71	28,51	0,53	0,54	
7	14,62	31,03	0,26	0,60	13,97
	12,95	26,63	0,23	0,50	
	14,33	25,45	0,26	0,48	
9	18,94	29,00	0,34	0,55	18,74
	18,44	26,78	0,33	0,50	
	18,85	25,85	0,34	0,48	
14	27,93	31,01	0,53	0,60	27,26
	26,22	29,12	0,49	0,56	
	27,63	29,74	0,52	0,57	
15	22,53	32,06	0,41	0,63	21,76
	20,58	28,98	0,38	0,55	
	22,19	28,85	0,41	0,55	



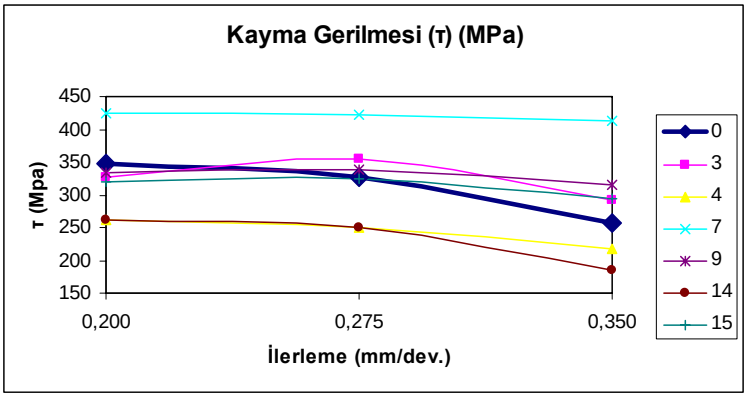
Şekil 3.29 : Etkin sürtünme katsyısı (μ).

Bölüm 1.4'de (1.12) ve (1.25) denklemleri ile tanımlanan kayma açısı (Ø) ve kayma gerilmesi (τ) değerleri de hesaplanarak Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10 : Kayma açısı (Ø) ve kayma gerilmesi (τ) değerleri.

Numune Nu.	Kayma Açısı (rad) (Ø)	Kayma Açısı (derece) (Ø)	Ortalama Kayma Açısı (rad) ($Ø_{ort}$)	Ortalama Kayma Açısı (derece) ($Ø_{ort}$)	Kayma Gerilmesi (MPa) (τ)	Ortalama Kayma Gerilmesi (MPa) ($τ_{ort}$)
0	0,92	52,82	0,985	56,41	346,93	310,41
	0,98	55,88			327,21	
	1,06	60,54			257,08	
3	0,94	53,68	0,963	55,16	325,75	324,10
	0,95	54,52			354,03	
	1,00	57,28			292,52	
4	0,91	51,90	0,947	54,25	260,47	242,37
	0,96	54,91			250,17	
	0,98	55,95			216,46	
7	0,94	53,99	0,971	55,62	425,21	420,02
	1,00	57,07			421,96	
	0,97	55,78			412,88	
9	0,94	53,99	0,958	54,90	332,79	328,38
	0,95	54,65			338,25	
	0,98	56,07			314,11	
14	0,92	52,69	0,969	55,51	262,53	232,84
	0,97	55,61			250,00	
	1,02	58,23			185,98	
15	0,92	52,70	0,949	54,38	319,63	313,02
	0,96	55,01			325,15	
	0,97	55,44			294,30	

Kayma gerilmesinin değişimi Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Buna göre özellikle 4 ve 14 numaralı uçlarda kayma gerilmesinin borlanmamış sıfır numaralı uca göre oldukça düşük seviyede olduğu görülmektedir.



Şekil 3.30 : Kayma gerilmesi (τ).

Yukarıda ifade edilen ortogonal kesme testleri sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde; sonuçların plazma borlanmış bazı numunelerde sürtünme katsayısının borlanmamış numuneye göre daha düşük gerçekleştiği, benzer şekilde ortogonal kesme esnasında oluşan kayma gerilmesi değerinin de bazı numunelerde oldukça düşük seviyede olduğu görülmüştür.

3.1.4 Aşınma testleri ölçüm sonuçları

Yapılan aşınma testi ve ölçümler sonucunda serbest yüzeyde meydana gelen aşınma değerleri (VB- μm) Çizelge 3.11'de, talaş yüzeyinde ölçülen aşınma alanı değerleri (μm^2) ise Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.11 : Serbest yüzey aşınma değerleri (VB).

Test Süresi (dk)	**Numune Numarası**				
	0	**4**	**7**	**9**	**13**
	VB Aşınma Değerleri (μm)				
9	202,59	92,16	181,97	160,03	190,14
15	252,91	112,45	202,44	188,26	214,42
21	303,43	128,76	232,74	193,13	228,44
27	364,51	145,43	257,60	223,81	243,26
33		167,35	293,75	259,47	272,69
39		202,44	334,71	278,71	287,26
51		235,27		364,25	382
63		310,66			

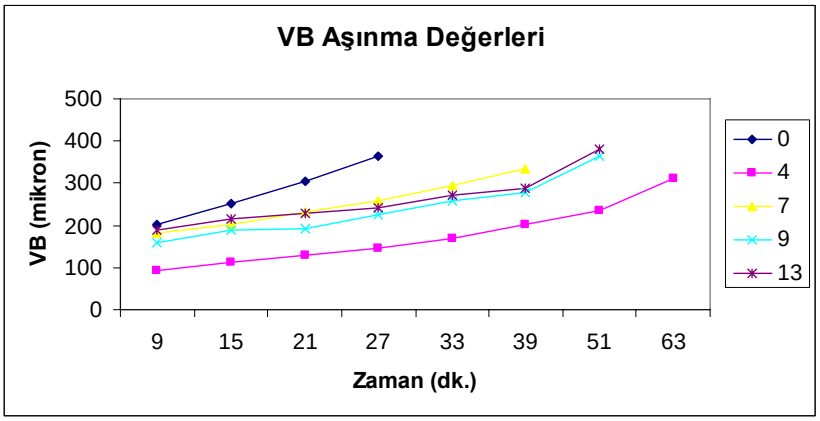
Çizelge 3.12 : Talaş yüzeyi aşınma alanı değerleri.

Test Numarası	**Test Süresi (dk)**	**Test Süresi (sn)**	**Talaş Yüzeyi Aşınma Alanı Değerleri (μm^2)**					
			0	**4**	**7**	**9**	**13**	**14**
7	**4,5**	**270**			31260		13300	
8	**6**	**360**			45850		32630	
9	**9**	**540**	6346		62320		45840	
10	**15**	**900**	15790		70830		119300	
11	**21**	**1260**	52440	18960	108500	5833	162400	
12	**27**	**1620**		33980		8055		14110
13	**39**	**2340**		143900		29840		69700

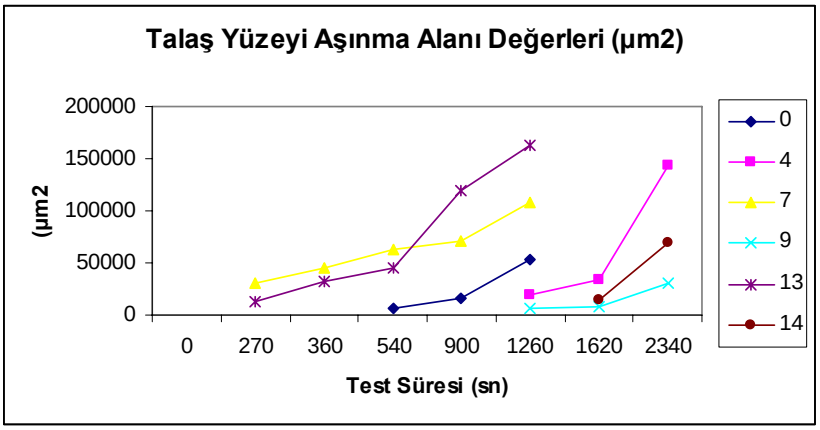
Yukarıdaki çizelgelerde verilen değerlerin grafik olarak çizimleri ise aşağıda verilmiştir. Şekil 3.31'den de görüldüğü üzere borlanmamış takım olan sıfır numaralı

uç, 21'inci dakikada (1260 sn) 303,43 µm VB değerine ulaşmakta iken, 4 numaralı takım 63'üncü dakikada 310,66 µm VB değerine, 9 numaralı takım da 39'uncu dakikada 278,71 µm VB değerine ulaşmaktadır. Bu verilerden de görüleceği üzere 4 numaralı takımın ömrü, sıfır numaralı takıma göre üç kat artmıştır. 4, 7, 9 ve 13 numaralı takımların tamamının aşınma ömürlerinin sıfır numaralı takıma göre arttığı belirlenmiştir.

Talaş yüzeyinde oluşan aşınan bölgenin alan değerlerinin değişimi Şekil 3.32'de görülmektedir.



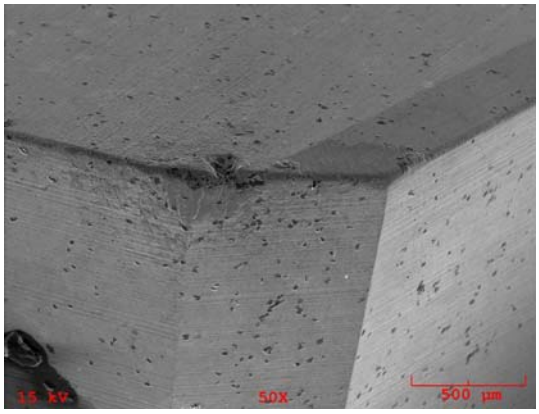
Şekil 3.31 : Serbest yüzey aşınma değerleri (VB).



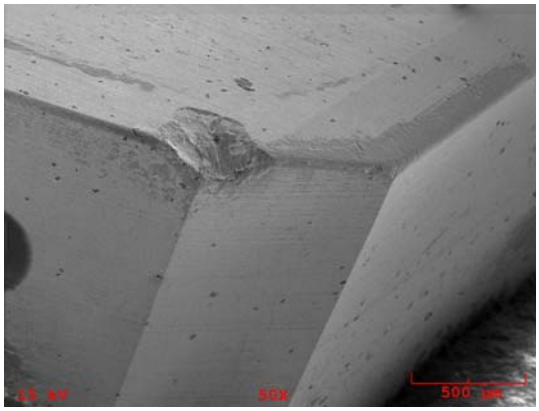
Şekil 3.32 : Talaş yüzeyi aşınma alanı değerleri.

Aşınma testleri yukarıda ve Çizelge 3.11'de verilen sürelerde kesilmiş ve bu sürelerde takımın yan yüzeyinde oluşan aşınma miktarları Optik Mikroskop Görüntü Analizi sistemi ile görüntülenmiştir. Bu şekilde kesici uçların yan yüzeylerinden alınan görüntüler ile kesici uçlara ait talaş yüzeyi optik mikroskop görüntüleri EK-A'da verilmiştir.

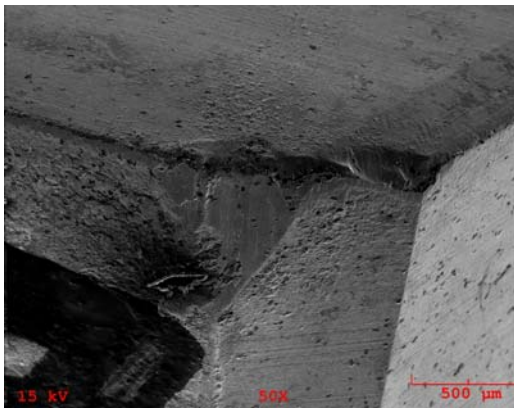
Aşınma testlerine tabi tutulan uçlardan ayrıca Çizelge 3.11'de belirtilen ömür süreleri sonunda Arçelik A.Ş.'nin Çayırova'daki tesislerinde bulunan taramalı elektron mikroskobu ile 50 kat büyütmeli SEM görüntüleri de alınmış ve Şekil 3.33'de verilmiştir.



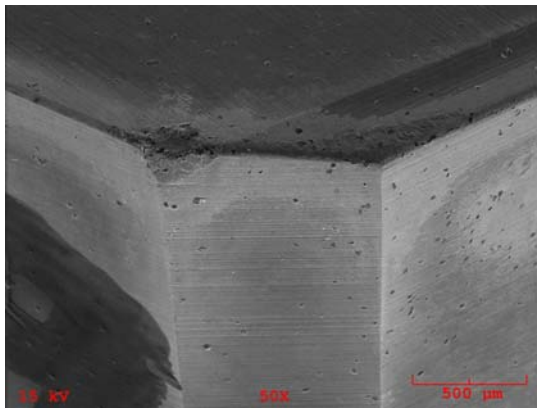
(a) 0 numaralı numune



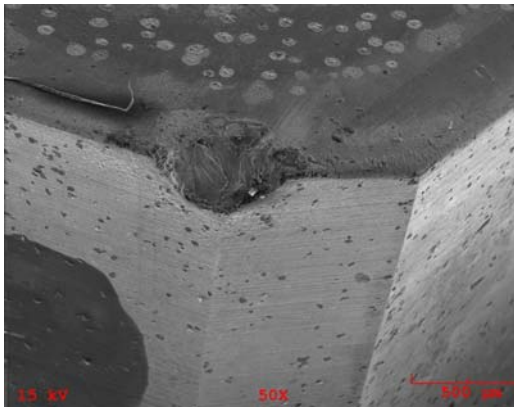
(b) 4 numaralı numune



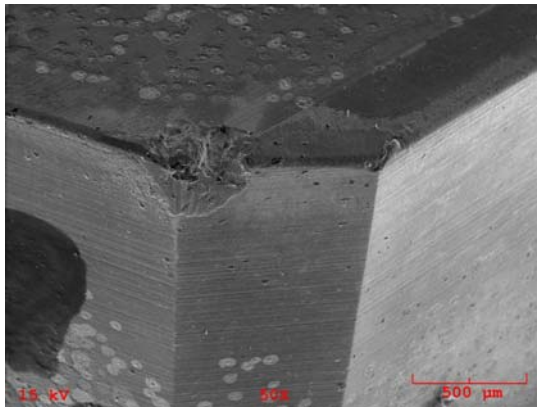
(c) 7 numaralı numune



(ç) 9 numaralı numune



(d) 13 numaralı numune



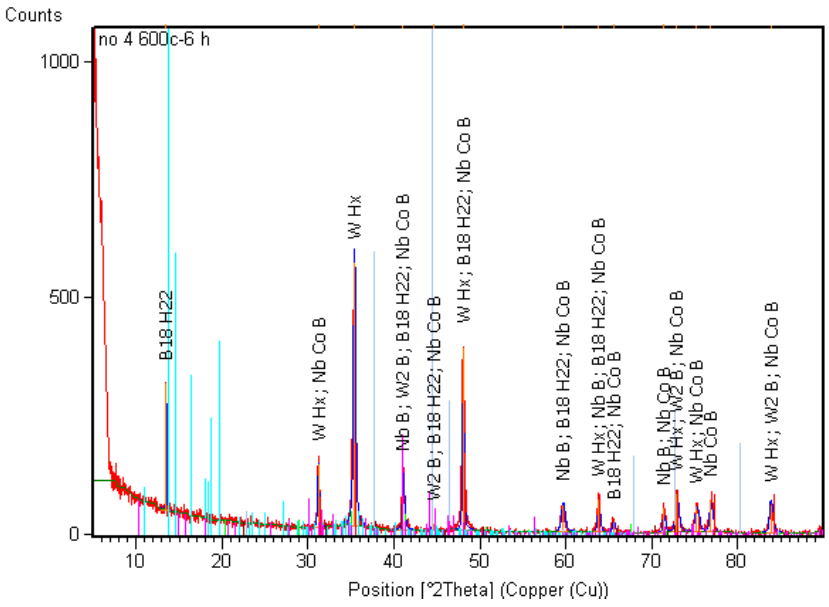
(e) 14 numaralı numune

Şekil 3.33 : Aşınma testleri sonucunda alınan 50X büyütmeli SEM görüntüleri.

Plazma borlama ile plazma nitrürlemenin aşınma testleri açısından karşılaştırmasını yapmak üzere Özdemir U., ve Erten M.,[1] tarafından WC sert metal plaketlere yapılan plazma nitrürleme işlemi incelenmiştir. Plazma nitrürleme işlemi, %75 H_2 + %25 N_2 ve %75 H_2 + %25 N_2 gaz ortamlarında ve 500, 550, 600, 650, 700 ^oC sıcaklıklarda 1, 2, 4, 6, ve 8 saat sürelerle yapılmıştır. Plazma nitrürleme işlemi sonucunda kesici takımlar, AISI 1020 malzeme üzerinde 130 m/dk kesme hızı, 0.15 mm/diş ilerleme hızı, 1-1.25 mm kesme derinliği ile alın frezeleme testlerine tabi tutulmuş ve yan yüzey aşınmaları ölçülmüştür. Plazma nitrürlenmiş kesici takımların aşınma testleri sonucunda 700 ^oC sıcaklıkta 2 saat nitrürlenmiş kesici ucun performansında nitrürlenmemiş uca göre %81.3'lük bir artış elde edildiği belirtilmektedir. Plazma borlanmış kesici uçlar farklı malzeme üzerinde (Ti-6Al-4V) aşınma testlerine tabi tutulduğundan dolayı plazma nitrürlenmiş uçlarla doğrudan bir karşılaştırma yapılması ygun olmamakla birlikte işlenmesi daha zor olan titanyum alaşımında elde edilen yaklaşık %200'lük performans artışının oldukça iyi bir sonuç olduğu değerlendirilmektedir.

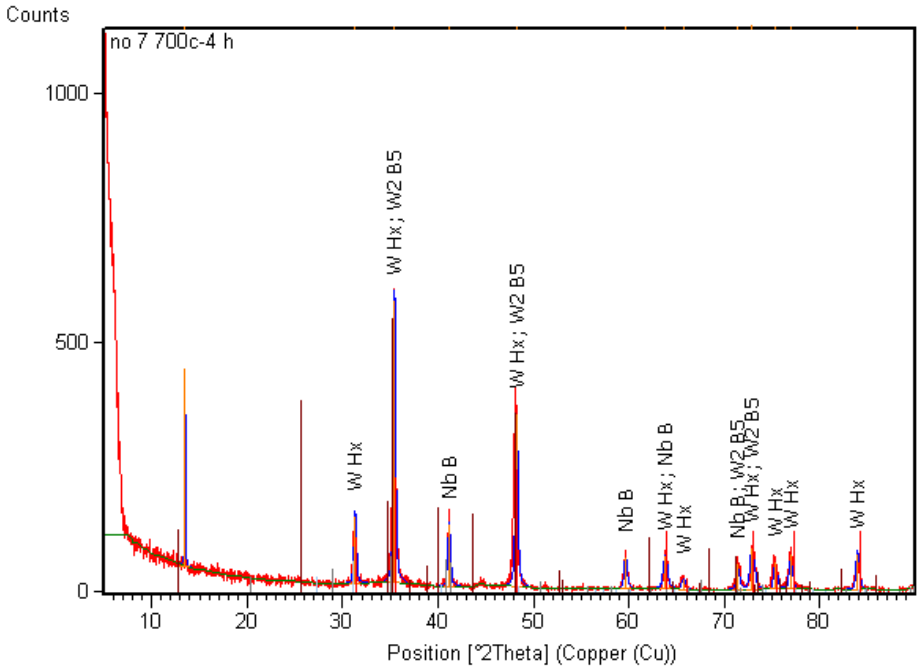
3.1.5 XRD ölçüm sonuçları

4 numaralı plazma borlanmış numunenin XRD ölçümü sonrasında elde edilen yüzey bileşikleri Şekil 3.34'de görülmektedir. Plazma borlama sonrasında yüzeyde $B_{18}H_{22}$, WH_x, NbCoB, NbB, W_2B, NbB bileşiklerinin oluştuğu görülmektedir. Burada oluşan W_2B bileşiği temel olarak plazma borlama sonucunda oluşması istenen bileşik olup aşınma testlerindeki iyileşmeye sebep olan bileşik olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 3.34 : 4 numaralı numune XRD ölçümü sonucu.

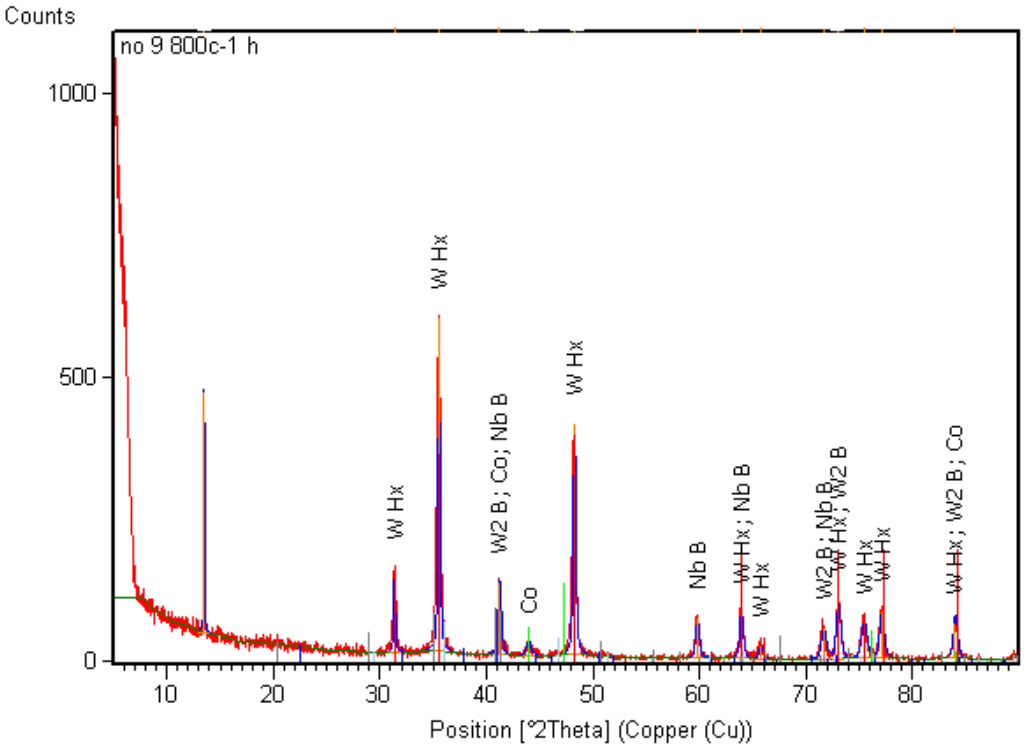
7 numaralı numuneye ait XRD ölçümü sonucunda elde edilen bileşikler Şekil 3.35'de vrilen piklerde görülmektedir. 7 numaralı numunede WH_x, W_2B_5, ve NbB bileşiklerinin oluştuğu XRD ölçümlerinden anlaşılmaktadır. Burada 4 numaralı numuneden farklı olarak 7 numaralı numunede, W_2B bileşiği değil W_2B_5 bileşiğinin oluştuğu görülmektedir. Yukarıda açıklanan aşınma testlerinde 4 numaralı numunenin 7 numaralı numuneye göre daha iyi sonuç vermesinin sebebinin oluşan bu bileşik farkından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



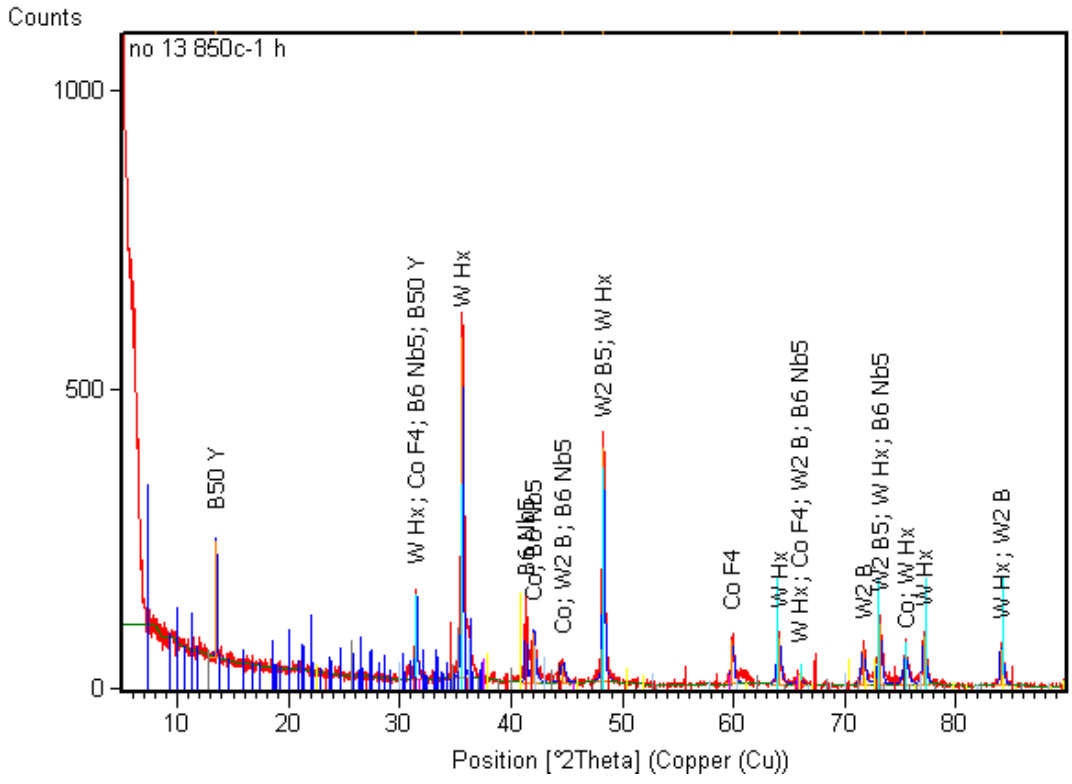
Şekil 3.35 : 7 numaralı numune XRD ölçümü sonucu.

9 numaralı numuneye ait XRD ölçümü sonucunda elde edilen bileşikler Şekil 3.36'da görülmektedir. 9 numaralı numunede WH_x, W_2B ve NbB bileşiklerinin oluştuğu görülmektedir. Aşınma testlerinde iyi sonuçlar veren 9 numaralı numunede de bu iyileşmeyi W_2B bileşiğinin oluşturduğu değerlendirilmektedir.

13 numaralı numuneye ait XRD ölçümü sonucunda oluşan bileşikler Şekil 3.37'de görülmektedir. Bu numunede $B_{50}Y$, WH_x, CoF_4, B_6Nb_5, W_2B ve W_2B_5 bileşiklerinin oluştuğu görülmektedir. Bu numunede 4, 7 ve 9 numaralı numunelerden farklı olarak W_2B ve W_2B_5 bileşiklerinin beraber oluştuğu görülmüştür.



Şekil 3.36 : 9 numaralı numune XRD ölçümü sonucu.

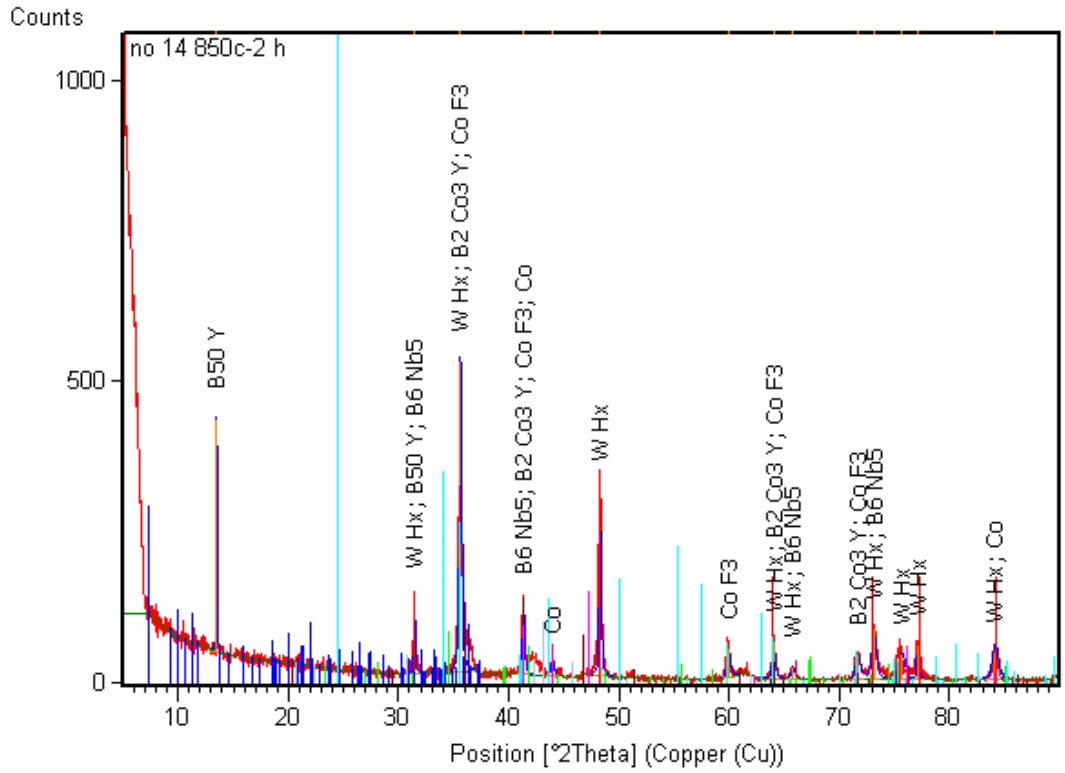


Şekil 3.37 : 13 numaralı numune XRD ölçümü sonucu.

14 numaralı numuneye ait XRD ölçümü sonucunda oluşan bileşikler Şekil 3.38'de görülmektedir. Bu numunede $B_{50}Y$, WH_x, B_6Nb_5, B_2Co_3, CoF_3, B_2Co_3Y

bileşiklerinin oluştuğu görülmektedir. Her ne kadar Şekil 3.38'de gösterilen piklerde görünmemesine karşılık XRD ciahazından alınan detaylı listede bu numune için WB bileşiğinin oluştuğu görülmüştür.

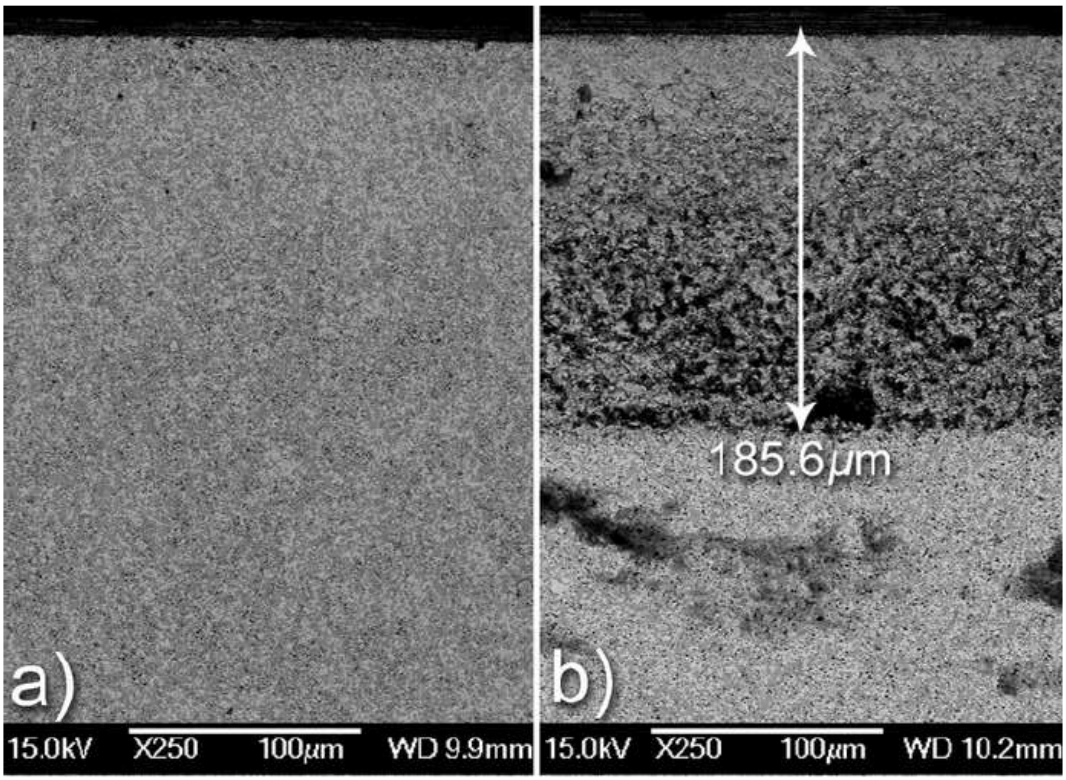
Sonuç olarak XRD ölçümleri ile WC kesici takımların yüzeyinde W_2B, W_2B_5 ve WB bileşiklerinin oluştuğu ve bu bileşiklerin takımın aşınma dayanımına olumlu katkı sağladığı görülmüştür.



Şekil 3.38 : 14 numaralı numune XRD ölçümü sonucu.

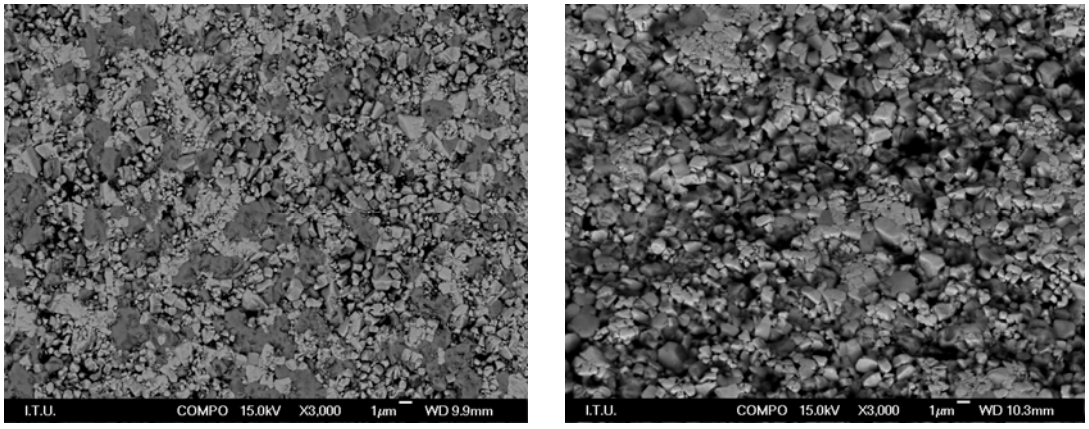
3.1.6 SEM ölçüm sonuçları

0 ve 9 numaralı numunenin kesiti alındıktan sonra yapılan SEM ölçümünde alınan görüntüleri Şekil 3.39'da verilmiştir. Alınan SEM görüntüsünden 9 numaralı numunede 185.6 µm kalınlığında bir nüfuziyet bölgesi olduğu görülmüştür.



Şekil 3.39 : (a) 0 numaralı numune, (b) 9 numaralı numune SEM görüntüleri.

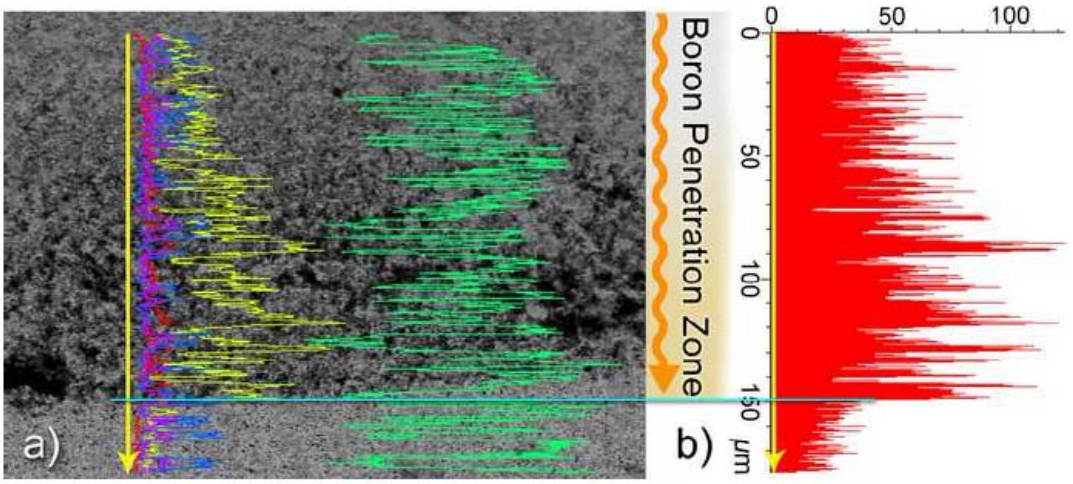
9 numaralı numunenin nüfuziyet bölgesinin dışındaki ana malzeme ile nüfuziyet bölgesinin 3000 kat büyütmeli kompozisyon görüntüsü Şekil 3.40'da verilmiştir.



(a) 0 numaralı numune **(b)** 9 numaralı numune

Şekil 3.40 : 0 ve 9 numaralı numunelerin 3000X kompozisyon görüntüleri.

Şekil 3.40'da verilen kompozisyon görüntülerinden de farklı olduğu anlaşılan nüfuziyet bölgesindeki farkı daha iyi analiz edebilmek amacıyla bu bölgenin Doğru Tarama (Line-Scan-LS) atom analizi de yapılmış ve Şekil 3.41'de verilmiştir.



Şekil 3.41 : (a) 9 numaralı numunenin LS atom analizi, **(**b) Bor atomu değişimi.

Şekil 3.41'den de görüldüğü üzere nüfuziyet bölgesinin dışında bor atomları olmadığı halde, nüfuziyet bölgesinde Şekil 3.41 (b)'de verilen değişim oranında bor atomlarının nüfuz ettiği ve daha önce açıklanan XRD ölçümlerinde de görüldüğü üzere W_2B bileşiğinin oluştuğu görülmüştür. Şekil 3.41 (a)'da verilen LS ataom analizinde kırmızı renk bor (B) atomlarını temsil ederken, yeşil renk tungsten (W) atomlarını, sarı renk karbon (C) atomlarını, mavi renk titanyum (Ti) atomlarını, pembe renk ise Neobyum (Nb) atomlarını temsil etmektedir.

Sonuç olarak SEM ölçümleri ile 9 numaralı numunede oluşan nüfuziyet tabakasının 185.6 µm kalınlığında olduğu ve bu bölgeye bor ataomlarının nüfuz ettiği ve XRD ölçümlerinde ifade edildiği üzere W_2B bileşiğinin oluştuğu tespit edilmiştir. Aşınma testlerinde elde edilen iyileşmenin de oluşan bu bileşikten kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

3.1.7 Mikrosertlik ölçüm sonuçları

Mikrosertlik ölçümleri iki aşamada yapılmış; birinci aşamada tüm numunelerin sertlik ölçümleri yüzeyden yapılmış, ikinci aşamada ise sadece aşınma testlerine tabi tutulan 0, 4, 7, 9, 13, ve 14 numaralı numunelerin kesiti alınarak kesitten sertlik ölçümleri yapılmıştır.

3.1.7.1 Yüzeyden mikrosertlik ölçümü sonuçları

Plazma borlanmış ve borlanmamış bütün WC kesici uçların yüzeyindeki sertlik değişimini belirleyebilmek amacıyla 12.7 mm genişliğinde olan kesici uçların bir kenarından itibaren 0,3mm, 3 mm, 6.35 mm, 9.7 mm ve 12.4 mm mesafelerde ikişer defa olmak üzere 20 saniye süresince 100 g ağırlık uygulanarak Vickers mikrosertlik

ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen mikrosertlik değerleri (HV) Çizelge 3.13'de verilmiştir. Borlanmamış 0 numaralı numunenin ortlama mikrosertlik değerinin 1536 HV değerinde olduğu belirlenmiş, buna karşılık plazma borlanmış diğer numunelerin yüzeyinde ölçülen noktasal mikrosertlik değerlerinin 15 numaralı numuneden alınan 1452 HV ile, 11 numaralı numuneden alınan 3898 HV arasında değiştiği görülmüştür. Burada noktasal olarak değerlendirildiğinde 11 numaralı numunede mikrosertlik değerinde 2.59 kat artış elde edilmiştir.

Çizelge 3.13 : Yüzeyden alınan Vickers mikrosertlik değerleri.

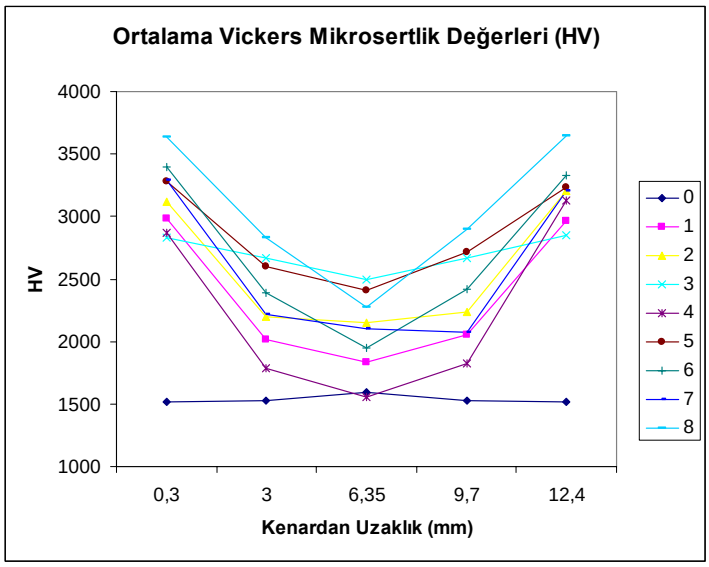
Numune Nu.	**Vickers Mikrosertlik Değerleri (HV)**				
	Kenardan Mesafe (mm)				
	0,3	**3**	**6,35**	**9,7**	**12,4**
0	1523	1532	1625	1533	1528
	1505	1524	1565	1519	1515
1	2930	2053	1885	2012	2987
	3034	1987	1792	2105	2944
2	3077	2187	2248	2297	3197
	3152	2205	2052	2176	3205
3	2855	2652	2503	2638	2891
	2803	2687	2497	2697	2807
4	2915	1725	1456	1735	3160
	2829	1854	1665	1906	3104
5	3212	2542	2462	2697	3223
	3359	2653	2358	2743	3252
6	3385	2361	1897	2387	3297
	3407	2409	2008	2456	3356
7	3351	2167	2089	2171	3437
	3223	2268	2124	1975	2976
8	3679	2862	2288	2907	3698
	3592	2796	2256	2896	3602
9	3094	2721	2939	2717	3043
	3152	2871	2969	2822	3152
10	3413	3043	2939	2996	3472
	3387	2956	2867	2957	3409
11	3573	3096	2665	3137	3721
	3702	3157	2597	3095	3898
12	2759	2518	1843	2439	2664
	2697	2487	1957	2556	2696
13	2015	1891	1852	1958	2173
	1993	1757	1963	1863	2052
14	2376	2307	2310	2211	2408
	2284	2357	2257	2259	2297
15	1888	1866	1452	1857	1959
	1946	1752	1503	1832	1968
16	1559	1497	1555	1597	1657
	1623	1502	1569	1603	1696

Yukarıda verilen ölçümlere ait ortalama değerler de Çizelge 3.14'de verilmiştir. Ortalama değerler açısından bakıldığında mikrosertlik değerlerinin 15 numaralı numunede hesaplanan 1477.5 HV değeri ile 11 numaralı numunede elde edilen 3809.5 HV değeri arasında değiştiği ve görülmektedir.

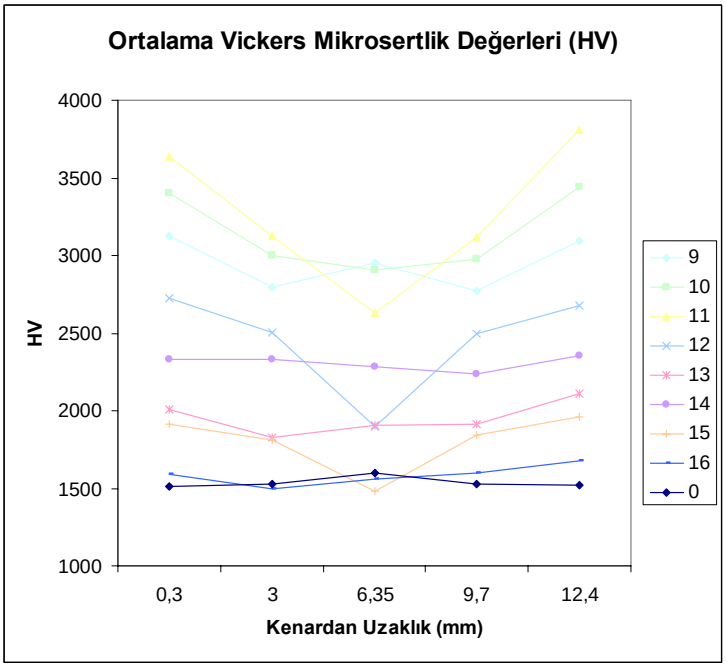
Çizelge 3.14 : Yüzeyden alınan ortalama Vickers mikrosertlik değerleri.

Numune Nu.	Ortalama Vickers Mikrosertlik Değerleri (HV)				
	Kenardan Mesafe (mm)				
	0,3	**3**	**6,35**	**9,7**	**12,4**
0	1514	1528	1595	1526	1521,5
1	2982	2020	1838,5	2058,5	2965,5
2	3114,5	2196	2150	2236,5	3201
3	2829	2669,5	2500	2667,5	2849
4	2872	1789,5	1560,5	1820,5	3132
5	3285,5	2597,5	2410	2720	3237,5
6	3396	2385	1952,5	2421,5	3326,5
7	3287	2217,5	2106,5	2073	3206,5
8	3635,5	2829	2272	2901,5	3650
9	3123	2796	2954	2769,5	3097,5
10	3400	2999,5	2903	2976,5	3440,5
11	3637,5	3126,5	2631	3116	3809,5
12	2728	2502,5	1900	2497,5	2680
13	2004	1824	1907,5	1910,5	2112,5
14	2330	2332	2283,5	2235	2352,5
15	1917	1809	1477,5	1844,5	1963,5
16	1591	1499,5	1562	1600	1676,5

Ortalama mikrosertlik değerlerinden 0-8 arası numunelerdeki değişim grafik olarak Şekil 3.42'de, 9-16 arası numunelerdeki değişim de Şekil 3.43'de verilmiştir.



Şekil 3.42 : 0-8 arası numunelerin ortalama Vickers mikrosertlik değerleri.



Şekil 3.43 : 9-16 arası numunelerin ortalama Vickers mikrosertlik değerleri.

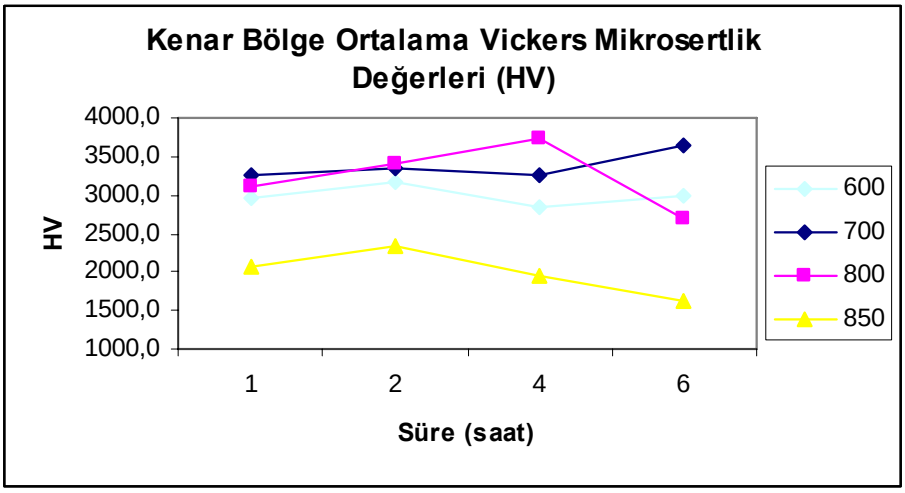
Yukarıdaki grafiklerden, plazma borlanmış numunelerin kenar bölgelerindeki mikrosertlik değerlerinin orta bölgedeki mikrosertlik değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, frezelemede oluşan darbeli kesme için kesici takımın tokluğu açısından olumlu bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır. Kenar bölgelerde sertliğin daha yüksek çıkmasının sebebinin, plazma borlama esnasında kesici uçların kenar bölgelerindeki manyetik alanın daha yoğun olması ve bunun sonucu olarak da bu bölgelerde bor bileşiklerinin daha yoğun bir şekilde oluşmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Çizelge 2.1'de belirtilen sıcaklık ve süre gibi plazma borlama parametrelerinin mikrosertlik değişimine etkisini daha iyi görebilmek amacıyla bu parametreler bazında oluşturulan grafikleri incelemekte fayda olduğu değerlendirilmektedir. Bu amaçla Çizelge 3.14'de verilen ortalama sertlik değerlerinden talaş kaldırma esnasında etkin olan kenar bölgeyi temsil eden 0.3 mm ve 12.4 mm mesafeler için elde edilen değerlerin de ortalaması alındığında Çizelge 3.15'de verilen değerler elde edilmektedir. Buna göre zamana göre plazma borlanmış numunelerin kenar bölge ortalama mikrosertlik değişimleri Şekil 3.44'de görülmektedir. Bu grafiğe göre borlama zamanı 2 saatin üzerine çıktığında 600, 700 ve 850 ^{o}C'deki borlamalar için sertlik değerinin düştüğü, 800 ^{o}C'de yapılan borlamada ise 4 saatin üzerinde sertlik değerinin düştüğü görülmektedir. Ayrıca 600 ve 700 ^{o}C'de yapılan borlamada 4 saatten sonra sertliğin yine arttığı görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde 1

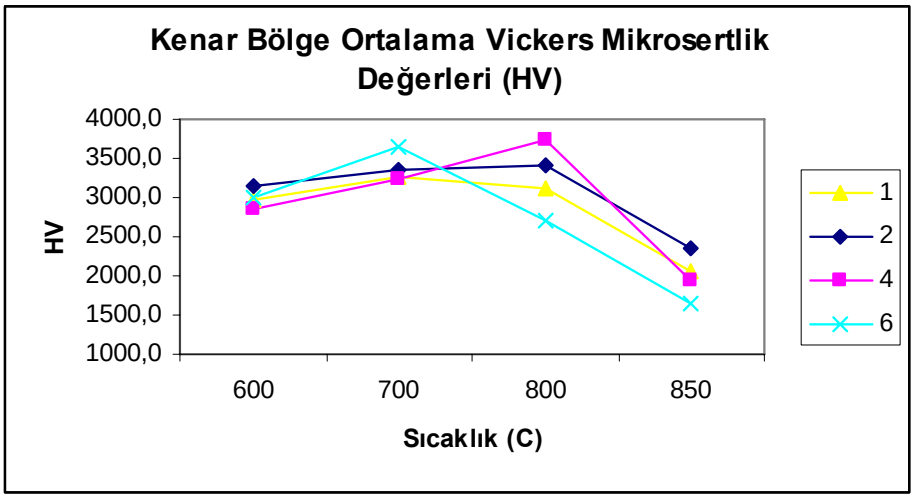
veya 2 saat süreyle plazma borlama yapmanın en uygun değerler olacağını belirtmek mümkün olmaktadır. Kenar bölge ortalama sertlik değişimlerinin plazma borlama sıcaklığına göre değişimleri ise Şekil 3.45'de görülmektedir.

Çizelge 3.15 : Kenar bölge ortalama Vickers mikrosertlik değerleri.

Numune Nu.	Plazma Borlama Parametreleri		Kenar Bölge Ortalama Sertlik Değeri (HV)
	Sıcaklık (°C)	Süre (Saat)	
0			1517,8
1	600	1	2973,8
2	600	2	3157,8
3	600	4	2839,0
4	600	6	3002,0
5	700	1	3261,5
6	700	2	3361,3
7	700	4	3246,8
8	700	6	3642,8
9	800	1	3110,3
10	800	2	3420,3
11	800	4	3723,5
12	800	6	2704,0
13	850	1	2058,3
14	850	2	2341,3
15	850	4	1940,3
16	850	6	1633,8



Şekil 3.44 : Zamana göre kenar bölge ortalama mikrosertlik değişimi.



Şekil 3.45 : Sıcaklığa göre kenar bölge ortalama mikrosertlik değişimi.

Bu grafiğe göre (Şekil 3.45) 1, 2 ve 4 saatlik sürelerle plazma borlamalarda 800 ^{o}C'ye kadar sertlik artmakta, bu sıcaklıktan sonra ise sertlik azalmaktadır. 6 saatlik borlamalarda ise 700 ^{o}C'den sonra sertliğin azaldığı görülmektedir. Bu durumda genel olarak bir değerlendirme yapılırsa 800 ^{o}C'de plazma borlama yapmanın en uygun değer olacağını belirtmek mümkündür. Yukarıda belirtilen aşınma testlerinde en iyi sonucu veren 9 numaralı numunenin 800^{o}C'de 1 saat süreyle plazma borlama ile elde edildiği düşünüldüğünde yukarıda yapılan değerlendirme ile uyum sağladığı görülmektedir.

Çizelge 3.15'de verilen kenar bölge ortalama sertlik değerleri plazma borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişik değerler almaktadır. Ortalama sertlik değerlerini sıcaklık ve süre olarak iki farklı parametre yerine, Hollomon-Jaffee Parametresi [77] olarak tanımlanan tek bir parametreye bağlı olarak elde etmek için aşağıdaki denklem kullanılır:

$$H.P. = \frac{T(5+\log t)}{100} \qquad \textbf{(3.2)}$$

Bu denklemde;

H.P.:Hollomon-Jaffee Parametresi,

T: Sıcaklık (K)

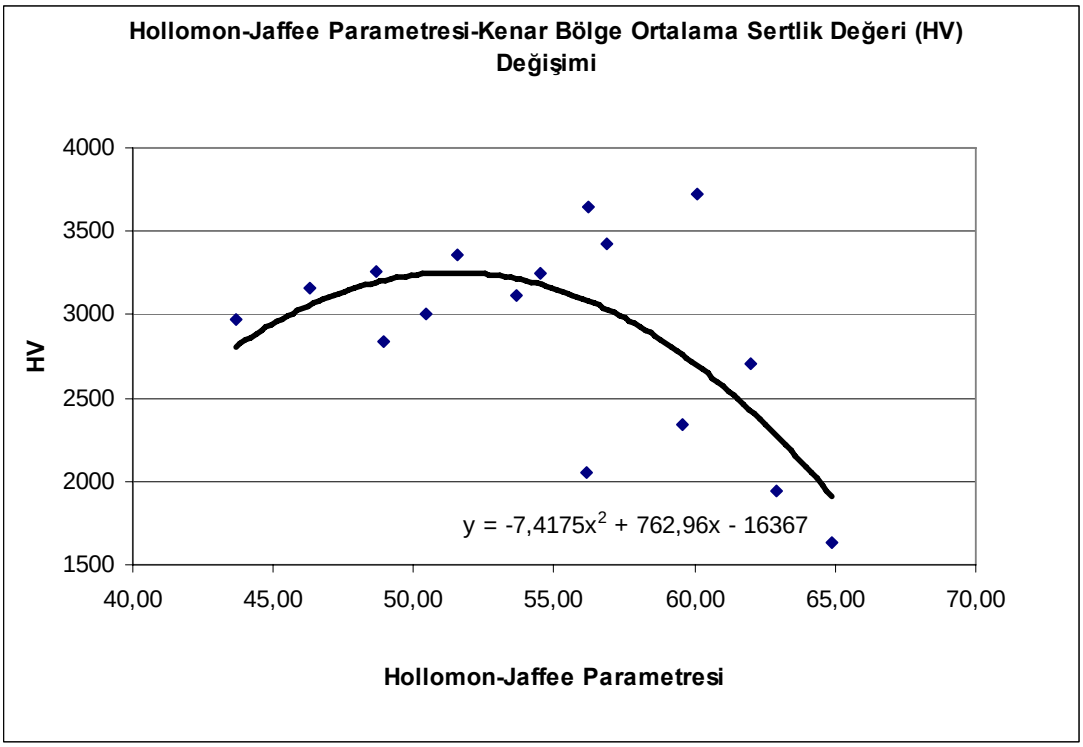
t: Süre (saat) olarak verilmektedir.

Çizelge 3.15'de verilen plazma borlama sıcaklık ve süre değeleri kullanılarak (3.2) denklemindeki Hollomon-Jaffee Parametreleri hesaplandığında Çizelge 3.16'da gösterilen değerler elde edilmektedir.

Çizelge 3.16 : Hollomon-Jaffee parametreleri.

Numune Nu.	Plazma Borlama Parametreleri		Kenar Bölge Ortalama Sertlik Değeri (HV)	Hollomon-Jaffee Parametreleri
	Sıcaklık (^oC)	Süre (Saat)		
0			1517,8	
1	600	1	2973,8	43,65
2	600	2	3157,8	46,28
3	600	4	2839,0	48,91
4	600	6	3002,0	50,44
5	700	1	3261,5	48,65
6	700	2	3361,3	51,58
7	700	4	3246,8	54,51
8	700	6	3642,8	56,22
9	800	1	3110,3	53,65
10	800	2	3420,3	56,88
11	800	4	3723,5	60,11
12	800	6	2704,0	62,00
13	850	1	2058,3	56,15
14	850	2	2341,3	59,53
15	850	4	1940,3	62,91
16	850	6	1633,8	64,89

Çizelge 3.16'da gösterilen Hollomon-Jaffee Parametreleri ile ortalama sertlik değerleri noktasal olarak ve bu noktalara göre ikinci dereceden uydurulan polinomun grafik olarak gösterimi ise Şekil 3.46'da gösterilmiştir.



Şekil 3.46 : Hollomon-Jaffee parametresi-ortalama sertlik değişimi.

Şekil 3.46'da verilen grafik kullanılarak WC kesici uç kenar bölgesinde elde edilmek istenen belirli bir sertlik değeri için gerekli olan Hollomon-Jaffee Parametresi elde edilerek buradan denklem (3.2) yardımıyla uygulanması gereken plazma borlama süresi veya sıcaklığı belirlenebilmektedir.

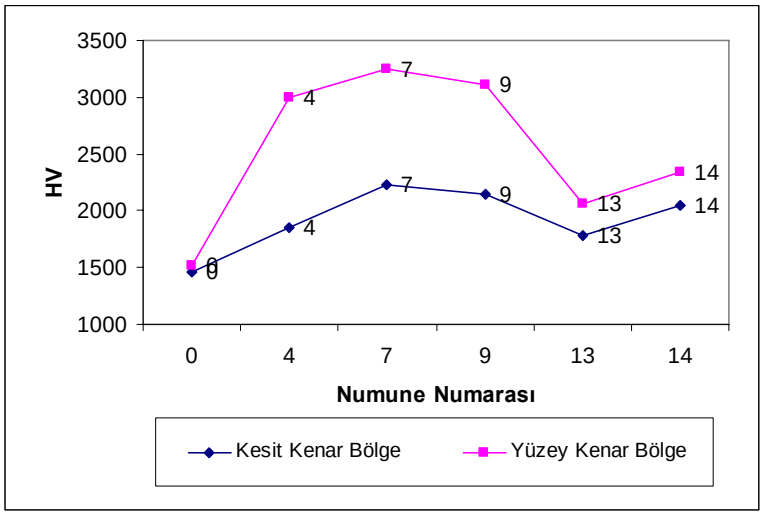
3.1.7.2 Kesitten mikrosertlik ölçümü sonuçları

Aşınma testlerine tabi tutulan 0, 4, 7, 9, 13 ve 14 numaralı numunelerin kesiti alınarak yüzeyden 0.1 mm ve 2 mm içeriden mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. 0.1 mm mesafeden yapılan ölçümler ile bor nüfuziyet tabakasının üzerinden ölçüm alınması, 2 mm mesafeden yapılan ölçüm ile de borlanmamış bölgenin mikrosertlik değerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan bu ölçüm sonuçları ile yüzeyden alınan kenar bölge sonuçları Çizelge 3.17'de görülmektedir.

Çizelge 3.17 : Kesitten alınan ortalama Vickers mikrosertlik değerleri.

Numune Nu.	Kesit Kenar Bölge Ortalama (0.1 mm HV)	Orta Bölge (2 mm-HV)	Yüzey Kenar Bölge Ortalama (HV)
0	1467	1455	1517,8
4	1846,8	1524	3002
7	2223,7	1531	3246,8
9	2150,2	1500	3110,3
13	1786,0	1523	2058,3
14	2045,8	1495	2341,3

Bu tablodan da görüldüğü üzere kesitten alınan mikrosertlik değerleri aynı numune için yüzeyden alınan mikrosertlik değerlerinden daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi, yüzeyden içeriye doğru oluşan W-B bileşiklerinin yoğunluğunun azalmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Yüzeyden itibaren 2mm mesafeden alınan ölçümlerde ortalama sertlik değerinin yaklaşık 1500 HV değerinde borlanmamış numune ile uyum gösterdiği görülmektedir. Çizelge 3.17'de verilen kesit ve yüzey kenar bölgelerdeki ortalama mikrosertlik değerlerinin değişimi Şekil 3.47'de verilmiştir. Bu grafikten herbir numune için yüzey ve kenar bölge ortalama mikrosertlik değişimlerinin benzer karakterde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.47 : Kesit ve yüzey kenar bölge mikrosertlik değişimi.

3.2 Değerlendirme

Yukarıda detaylı bir şekilde belirtilen deney, test ve ölçümlerle ilgili olarak aşağıdaki sonuç ve değerlendirmeleri yapmak mümkündür:

Deney düzeneği ile ilgili olarak;

• Ülkemizde bulunmayan plazma borlama deney tesisatının oluşturulması için geniş çaplı bir araştırma yapılmış, deney düzeneği dizayn edilmiş, imal ettirilmiş ve montajı yapılarak uzun bir süreç içerisinde birçok deneme sonucunda tekâmül ettirilerek faal hale getirilmiştir. İ.T.Ü. Makina Fakültesi'nde kurulan bu plazma borlama düzeneği ile bundan sonra da bir çok bilimsel araştırma yapılabilecek şekilde bir altyapı oluşturulmuştur.

• Deney düzeneğinin ihtiyacı olan doğru akım (DC) güç kaynağını karşılamak üzere tamamen özgün olarak bir doğru akım güç kaynağı da imal edilmiş ve plazma borlama deneylerinde başarıyla kullanılmıştır.

• Plazma borlama işleminin tungsten karbür (WC) kesme takımlarına başarıyla uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Frezelemede oluşan bileşke kesme kuvvetleri ile ilgili olarak;

• Plazma borlama sonrasında kesici uçlar, havacılık ve biyomedikal sanayiinde yaygın bir şekilde kullanılan Ti-6Al-4V titanyum alaşımı malzeme üzerinde alın frezeleme testlerine tabi tutulmuş ve bileşke kesme kuvvetleri ölçülmüş, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmış, ortogonal kesme testleri ile aşınma testleri yapılmıştır.

• Alın frezeleme testleri 200, 350, 500 ve 650 d/dk devir sayılarında ve 10, 20, 30, 40 mm/dk ilerleme ve 0.5 mm kesme derinliğinde yapılarak sonuçlar borlanmamış uçlarla karşılaştırılmıştır.

• 200 d/dk devir sayısında yapılan ölçümlerde 4 numaralı numunenin (600 ^{o}C'de 6 saat borlanmış) borlanmamış numuneye göre en düşük kesme kuvveti değerlerini verdiği, 2 numaralı numunenin ise (600 ^{o}C'de 2 saat borlanmış) borlanmamış numuneye göre 30 ve 40 mm/dk ilerlemelerde daha büyük kesme kuvveti oluşturduğu görülmüştür.

• 350 ve 500 d/dk'da yapılan ölçümlerde de 4 numaralı numunenin borlanmamış numuneye göre en düşük kesme kuvveti değerini verdiği görülmüştür. Genel olarak 2, 6, 7, 8, 9, 13, 14 ve 16 numaralı numunelerde de bileşke kesme kuvveti değerlerinin borlanmamış numuneye göre düştüğü ve daha iyi bir performans sağladığı görülmüştür.

• 650 d/dk'da yapılan ölçümde ise 9 ve 13 numaralı numunenin borlanmamış numuneye göre en düşük kesme kuvveti değerini verdiği, diğer numunelerin de genelde düşük kesme kuvveti oluşturduğu görülmüştür.

• Çizelge 3.1'de verilen bileşke kesme kuvvetleri ve 4'üncü bölümde verilen grafikler incelendiğinde; 2, 4, 7, 8, 9 ve 13 numaralı numunelerin 0 numaralı borlanmamış numuneye göre tüm devir sayılarında düşük kuvvet değerleri verdiği görülmüştür.

• 10, 20, 30 ve 40 mm/dk sabit ilerleme hızlarında ve değişik devir sayılarında ortaya çıkan bileşke kesme kuvvetleri incelendiğinde ise düşük devir sayılarında 4 numaralı numunenin daha iyi sonuç verdiği görülürken, yüksek devir sayısında (650 d/dk) 10 mm/dk ilerleme için 9, 20 ve 30 mm/dk ilerleme için 13 ve 40 mm/dk ilerleme için 7 numaralı numunenin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

• 2, 4, 7, 8, 9 ve 13 numaralı kesici uçların borlanmamış numuneye göre bileşke kesme kuvvetlerinde sağladığı ortalama yüzde iyileşme hesaplandığında ise; 200, 350 ve 500 d/dk devir sayılarında 4 numaralı kesici ucun, 650 d/dk devir sayısında ise 13 numaralı ucun bileşke kesme kuvvetinde en yüksek iyileşmeyi sağladığı görülmektedir. Bileşke kesme kuvvetinde en yüksek yüzde iyileşmeyi % 28.12 ile 350 d/dk'da 4 numaralı kesici uç sağlamaktadır. Tüm devir sayılarındaki ortalama yüzde iyileşme açısından ise en yüksek iyileşme % 21.31 ile 4 numaralı uçtan elde edilmekte, 9 numaralı uç da % 17.54 ile ikinci sırada gelmektedir.

• Yapılan ölçümler ve incelemeler sonucunda 200, 350 ve 500 d/dk devir sayılarında 4 numaralı ucun, yani 600 ^{o}C'de 6 saat süreyle plazma borlanmış olan ucun bileşke kesme kuvvetinde en iyi iyileşmeyi sağladığı; 650 d/dk devir sayısında ise yani yüksek kesme hızında (V= 163,36 m/dk) 9 numaralı ucun, yani 800 ^{o}C'de 1 saat süreyle plazma borlanmış olan ucun en yüksek iyileşmeyi sağladığı görülmüştür.

• Bileşke kuvvetlerde ortaya çıkan iyileşmelerin kesici uç kenar radyüsü ile ilgili olup olmadığını belirlemek amacyla kesici uçların kenar radyüsleri de ölçülmüş ve tüm kesici uçlarda kenar radyüsü 45-57 μm aralığında çıkmıştır. Dolayısıyla bileşke kuvvetlerde ortaya çıkan iyileşmenin kesici uç kenar radyüsündeki değişimle bir ilgisinin olmadığı belirlenmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü ile ilgili olarak;

• 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 11 ve 15 numaralı kesici uçlar ile yapılan işleme sonucunda Ti-6Al-4V alaşımı iş parçasında oluşan Ra, Rz ve Rq yüzey pürüzlülük değerleri de incelenmiştir.

• 200 d/dk devir ile işlenmesi durumunda iş parçası yüzeyinde oluşan Ra yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde 15 numaralı ucun yüzey pürüzlülük değerinin en düşük seviyede olduğu, kesme kuvveti açsından en iyi uçlardan biri olan 4 numaralı ucun ise ortalama olarak borlanmamış uç ile benzer yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmüştür.

• 350 d/dk devir ile işlenmesi durumunda iş parçası yüzeyinde oluşan Ra yüzey pürüzlülüğü değerlerinde 4 numaralı ucun yine ortalama olarak borlanmamış uç ile benzer yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmüştür.

• 500 d/dk devir ile işlenmesi durumunda Ra yüzey pürüzlülüğü değerleri incelendiğinde; 7 numaralı ucun en kötü yüzey pürüzlülük değeri verdiği, 15 numaralı ucun en düşük yüzey pürüzlülük değeri verdiği ve 4 numaralı ucun ise yine ortalama olarak borlanmamış uç ile benzer yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmüştür.

• 650 d/dk devir ile işlenme durumunda Ra yüzey pürüzlülüğü değerleri incelendiğinde 4 numaralı ucun yine ortalama olarak borlanmamış uç ile benzer yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmüştür.

• Ra, Rz ve Rq yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde plazma borlanmış ve borlanmamış numuneler arasında yüzey pürüzlülük değerleri açısından çok belirgin bir farklılık olmadığı görülmüştür.

Ortogonal kesme testleri ile ilgili olarak;

• Plazma borlanmış 3, 4, 7, 9, 14 ve 15 numaralı kesici uçlara ve borlanmamış kesici uçlara ortogonal kesme testleri de yapılarak oluşan bileşke kesme kuvvetleri, kayma kuvvetleri ve açıları, sürtünme kuvvetleri, açıları ve katsayıları ile kesme sabitleri elde edilmiş ayrıca kayma gerilmeleri de hesaplanmıştır.

• Etkin sürtünme katsayısı değerinin değişimi (Şekil 3.29) incelendiğinde 3, 4, 7, 9 ve 14 numaralı uçlarda etkin sürtünme katsayısının borlanmamış sıfır numaralı uca göre daha düşük değerde olduğu görülmüştür.

• Kayma gerilmesinin değişimi (Şekil 3.30) incelendiğinde özellikle 4 ve 14 numaralı uçlarda kayma gerilmesinin borlanmamış sıfır numaralı uca göre oldukça düşük seviyede olduğu görülmüştür.

Aşınma testleri ile ilgili olarak;

• Plazma borlanmış kesici uçların takım ömrüne etkisini belirlemek amacıyla kesme kuvveti değerleri borlanmamış numuneye göre daha iyi çıkan 4, 7, 9 ve 13 numaralı kesici uçlar, Ti-6Al-4V malzeme üzerinde 70 m/dk kesme hızında değişik ilerlemelerde alın frezeleme ile aşınma testlerine tabi tutulmuş ve talaş ve serbest yüzeyleri incelenerek maksimum serbest yüzey aşınması (VB) ölçülmüştür.

• Aşınma testlerine göre; borlanmamış takım olan sıfır numaralı uç, 21'inci dakikada (1260 sn) 303.43 μm VB değerine ulaşmakta iken, 4 numaralı takım 63'üncü dakikada 310.66 μm VB değerine ulaşmakta ve takım ömründe üç kat artış sağlanmaktadır. Bunun yanında 9 ve 13 numaralı takımlar 39'uncu dakikada 287.71 μm ve 287.26 μm VB değerlerine, 7 numaralı takım da 33'üncü dakikada 293.75 μm VB değerine ulaşmaktadır.

• Plazma nitrürlenmiş kesici takımlar ile AISI 1020 malzemenin işlenmesi durumunda %81.3 performans artışı sağlanırken [1], plazma borlanmış kesici uçlar ile, işlenmesi daha zor olan Ti-6Al-4V malzemenin işlenmesinde yaklaşık %200 performans artışı sağlanmıştır.

XRD ve SEM ölçümleri ile ilgili olarak;

• Kesici takımlara yapılan XRD ölçümleri ile plazma borlama sonrasında WC kesici takımların yüzeyinde oluşan bileşikler incelenmiştir. SEM ölçümleri ile de WC kesici takımların kesiti alınarak plazma borlamanın yüzeyden itibaren nüfuziyeti görüntülenmiş ve bor penetrasyonu tespit edilmiştir.

• 4 ve 9 numaralı numunede W_2B bileşiğinin, 7 numaralı numunede W_2B_5 bileşiğinin, 13 numaralı numunede W_2B ve W_2B_5 bileşiklerinin, 14 numaralı numunede ise WB bileşiğinin oluştuğu tespit edilmiştir.

• XRD ölçümleri ile oluşan W_2B, W_2B_5 ve WB bileşiklerinin WC kesici uçların aşınma dayanımlarına olumlu katkı sağladığı görülmüştür.

• SEM ölçümleri ile 9 numaralı numunede oluşan nüfuziyet tabakasının 185.6 μm kalınlığında olduğu ve bu bölgeye bor atomlarının nüfuz ettiği ve XRD ölçümlerinde de belirlenen W_2B bileşiğinin oluştuğu tespit edilmiştir. Aşınma testlerinde elde edilen iyileşmenin de oluşan bu bileşikten kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Yüzeyden mikrosertlik ölçümleri ile ilgili olarak;

• Mikrosertlik ölçümleri iki aşamada yapılmış; birinci aşamada tüm numunelerin sertlik ölçümleri yüzeyden yapılmış, ikinci aşamada ise sadece Bölüm 4'te aşınma testlerine tabi tutulan 0, 4, 7, 9, 13, ve 14 numaralı numunelerin kesiti alınarak kesitten sertlik ölçümleri yapılmıştır.

• Yüzeyden yapılan mikrosertlik ölçümleri sonucunda 0 numaralı numunenin ortalama mikrosertlik değerinin 1536 HV değerinde olduğu belirlenmiş, buna

karşılık plazma borlanmış diğer numunelerin yüzeyinde ölçülen noktasal mikrosertlik değerlerinin 15 numaralı numuneden alınan 1452 HV ile, 11 numaralı numuneden alınan 3898 HV arasında değiştiği görülmüştür. Burada noktasal olarak değerlendirildiğinde 11 numaralı numunede mikrosertlik değerinde 2.59 kat artış elde edilmiştir.

• Plazma borlanmış numunelerin kenar bölgelerindeki mikrosertlik değerlerinin orta bölgedeki mikrosertlik değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun, frezelemede oluşan darbeli kesme için kesici takımın tokluğu açısından olumlu bir sonuç oluşturacağı değerlendirilmiştir.

• Kenar bölge ortalama sertlik değerleri açısından değerlendirildiğinde 1 veya 2 saat süreyle plazma borlama yapmanın mikrosertlik değerleri açısından en uygun sonuçları verdiği görülmüştür.

• Plazma borlama sıcaklığının mikrosertliğe etkisi açısından değerlendirildiğinde, 1, 2 ve 4 saatlik sürelerle plazma borlamalarda 800^{o}C'ye kadar sertliğin arttığı, bu sıcaklıktan sonra ise azaldığı, 6 saatlik borlamalarda ise 700^{o}C'den sonra sertliğin azaldığı görülmüştür. Bu durumda genel olarak bir değerlendirme yapıldığında 800^{o}C'de plazma borlama yapmanın en uygun değer olduğu görülmüştür. Aşınma testlerinde en iyi sonucu veren 9 numaralı numunenin 800^{o}C'de 1 saat süreyle plazma borlama ile elde edildiği düşünüldüğünde yukarıda yapılan değerlendirme ile uyum sağladığı görülmüştür.

• Kenar bölge ortalama sertlik değerleri için Hollomon-Jaffee Parametreleri elde edilmiş ve ikinci dereceden bir polinom elde edilerek istenen bir sertlik değeri için gerekli olacak olan plazma borlama sıcaklığı ve süresini elde etmek mümkün olmuştur.

• Plazma borlama ile plazma nitrürlemenin karşılaştırmasını yapmak üzere Özdemir U, ve Erten M.,[1] tarafından sert metal plaketlere yapılan plazma nitrürleme işlemi incelenmiştir. Plazma nitrürleme işlemi, %75 H_2 + %25 N_2 ve %75 H_2 + %25 N_2 gaz ortamlarında ve 500, 550, 600, 650, 700 ^{o}C sıcaklıklarda 1, 2, 4, 6, ve 8 saat sürelerle yapılmıştır. Plazma nitrürleme işlemi sonucunda elde edilen yüzey sertlikleri incelendiğinde, en yüksek sertlik değerinin 700 ^{o}C'de ve 2 saat sürede yapılan işlemde 2224 HV değerinde elde edildiği belirtilmiştir. Plazma nitrürleme ile plazma borlama karşılaştırıldığında ise; 700^{o}C ve 2 saatlik benzer şartlar değerlendirildiğinde

plazma nitrürlemede 2224 HV sertlik değerine karşılık plazma borlamada Çizelge 3.15'den de görüldüğü gibi 3361.3 HV sertlik değeri elde edilmiştir. Buna karşılık plazma borlamada en yüksek sertlik değeri 3723,5 HV ile 11 numaralı numunede 800 ^{o}C'de ve 4 saat süre ile plazma borlanması sonucunda elde edilmiştir. Buradan da görüldüğü üzere plazma borlama ile plazma nitrürlemeye göre yüzeyde oluşan mikro sertlik değeri açısından 1.67 kat artış elde edilmiştir.

Kesitten mikrosertlik ölçümleri ile ilgili olarak;

- 0, 4, 7, 9, 13 ve 14 numaralı numunelerin kesiti alınarak yüzeyden 0.1 mm ve 2 mm içeriden mikrosertlik ölçümleri yapılmış ve kesitten alınan mikrosertlik değerlerinin aynı numune için yüzeyden alınan mikrosertlik değerlerinden daha düşük çıktığı görülmüştür. Bunun sebebi, yüzeyden içeriye doğru oluşan W-B bileşiklerinin yoğunluğunun azalmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

- Kesitten alınan mikrosertlik değerleri ile yüzeyden alınan mikrosertlik değerlerinin değişminin benzer karakterde olduğu görülmüştür.

Ömür, mikrosertlik ve sürtünme katsayısı değerleri ile ilgili olarak;

Ömür, mikrosertlik ve sürtünme katsayısı değerlerini beraber değerlendirmek amacıyla Çizelge 3.18'i incelemek gerekmektedir.

Çizelge 3.18 : Ömür, mikrosertlik ve sürtünme katsayısı değerleri.

Nu.Nu.	Ortalama Mikrosertlik (HV)	Ömür (dk)	Ortalama Sürtünme Katsayısı	Oluşan Bileşik
0	1517,8	21	0,57	
4	3002	63	0,54	W_2B
7	3246,8	33	0,52	W_2B_5
9	3110,3	39	0,51	W_2B

Çizelge 3.18 incelendiğinde, ömür açısından en iyi sonucu veren 4 numaralı takımda sertliğin en yüksek değerde olmadığı, hatta 7 ve 9 numaralı takımlardan daha düşük değerde olduğu görülmektedir. Ayrıca sürtünme katsaysı değerinin de 7 ve 9 numaralı takımlardan daha düşük değerde olduğu görülmektedir. Çizelge 3.18'de en yüksek sertlik değerini veren 7 numaralı takımın ömür açısından 4 ve 9 numaralı takımlardan daha düşük olduğu sürtünme katsayısının ise her ikisinin ortalama değerinde olduğu görülmektedir.

Takımlarda oluşan mikrosertlik değerlerindeki artış, sürtünme katsayısındaki azalma ve bunların sonucunda ortaya çıkan ömür artışının temel sebebinin plazma borlama

sonrasında takım yüzeyinde oluşan ve Çizelge 3.18'de görülen W-B bileşiklerinin olduğu değerlendirilmektedir. 4, 7 ve 9 numaralı takımlarda oluşan bileşikler incelendiğinde; 4 ve 9 numaralı takımda W_2B bileşiğinin oluştuğu, 7 numaralı takımda ise W_2B_5 bileşiğinin oluştuğu görülmektedir. 4 numaralı takım 600^oC'de 6 saat süreyle plazma borlanmış, 9 numaralı takım ise 800^oC'de 1 saat plazma borlanmıştır. Farklı sıcaklık ve sürelere rağmen her iki durumda da W_2B bileşiğinin oluşmasının sebebi; 4 numaralı takım için sıcaklığın düşük olmasına rağmen uzun süre tutulması ile yüzeye nüfuz eden bor atomlarının artması, 9 numaralı takım için ise borlama süresinin kısa olmasına karşılık sıcaklığın yüksek olmasından dolayı bor atomlarının daha kolay bir şekilde yüzeye nüfuz etmesi ve sonuçta her iki durumda aynı bileşiğin oluşmasıdır. 7 numaralı takım, 700^oC'de 4 saat süreyle borlanmış olduğundan dolayı hem sıcaklığın 600^oC'ye göre yüksek olması, hem de sürenin uzun olmasından dolayı 4 ve 9 numaralı takıma göre daha fazla bor atomu yüzeye nüfuz etmiş ve sonuçta W_2B_5 bileşiği oluşmuştur. Mikrosertlik açısıdan W_2B_5 bileşiği daha iyi sonuç vermekte iken, ömür açısından değerlendirildiğinde W_2B bileşiğinin daha iyi sonuç verdiği Çizelge 3.18'de görülmektedir.

Yukarıda belirtilen sonuçlar itibariyle plazma borlama işlemi tungsten karbür (WC) kesici takımlara başarıyla uygulanmış ve işlenmesi oldukça zor olan Ti-6Al-4V titanyum alaşımının frezelenmesinde takım ömrü %200 performans artışıile yaklaşık üç kat değerine ulaşmıştır. Yaklaşık olarak yapılan hesapla kesici uç başına plazma borlamanın maliyetinin %5 ek maliyet getirdiği değerlendirildiğinde takım ömründe elde edilen bu iki katlık artış ile Ti-6Al-4V titanyum alaşımının işleme maliyetinin düşmesine büyük katkı sağlanacağı değerlendirilmektedir.

4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, talaşlı imalatta frezeleme işlemlerinde oldukça yaygın bir şekilde kullanılan SPKN 1203 tungsten karbür (WC) kesme takımlarına plazma (iyon) borlama işlemi yapılarak bu işlemin havacılık ve biyomedikal sanayiinde yaygın bir şekilde kullanılan Ti-6Al-4V malzemelerin yüzey frezelenmesi işleminde oluşan kesme kuvvetlerine, iş parçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiş, ayrıca ortogonal kesme ve aşınma testleri yapılmış ve plazma borlamanın kesme parametrelerine etkisi ile takım ömrüne etkisi incelenmiştir. Plazma borlanmış takımlara ayrıca XRD ve SEM ölçümleri de yapılarak plazma borlama sonucunda oluşan bileşikler ve bor nüfuziyet bölgesi incelenmiştir. Ayrıca kesici takımların yüzeyinden ve kesitinden mikrosertlik ölçümleri de yapılarak plazma borlamanın takım sertliğine etkisi incelenmiş ve tüm analizlerin sonuçları değerlendirilmiştir. Yapılan araştırma, inceleme ve analizler sonucunda özetle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Ülkemizde bulunmayan plazma borlama deney tesisatı oluşturulmuş ve sonraki bilimsel çalışmalar için bir altyapı oluşturulmuştur.

- Plazma borlama işleminin tungsten karbür (WC) kesme takımlarına başarıyla uygulanabilirliği gösterilmiştir.

- Plazma borlama sonrasında kesici uçlar, havacılık ve biyomedikal sanayiinde yaygın bir şekilde kullanılan Ti-6Al-4V titanyum alaşımı malzeme üzerinde alın frezeleme testlerine tabi tutulmuş ve bileşke kesme kuvvetleri ölçülmüş ve kesme kuvvetinde azalmalar tespit edilmiştir.

- Kesici takımlara Ti-6Al-4V malzeme üzerinde aşınma testleri yapılmış ve takım ömrü üç kata arttırılmıştır.

- Plazma borlama ile oluşan genel olarak W_2B, W_2B_5 ve WB bileşiklerinin WC kesici uçların aşınma dayanımlarına olumlu katkı sağladığı, W_2B bileşiğinin aşınma dayanımına katkısının daha fazla olduğu görülmüştür.

- Yüzeyden yapılan mikrosertlik ölçümleri sonucunda noktasal olarak değerlendirildiğinde borlanmış numunelerde borlanmamış numuneye göre mikrosertlik değerinde %259'a kadar artış elde edilmiştir.

- Plazma borlanmış kesici takımlar ile plazma nitürlenmiş kesici takımlar [1] karşılaştırıldığında ise, en yüksek ortalama mikrosertlik değeri açısından plazma borlamanın plazma nitrürlemeye göre 1.67 kat daha yüksek sonuç verdiği görülmüştür.

Yukarıda belirtilen sonuçlar itibariyle bilime katkı sağlayacak şekilde orijinal bir çalışma olarak plazma borlama işlemi tungsten karbür (WC) kesici takımlara başarıyla uygulanmış ve işlenmesi oldukça zor olan Ti-6Al-4V titanyum alaşımının frezelenmesinde takım ömrü borlanmamış takıma göre üç kata çıkmıştır. Yaklaşık olarak yapılan hesapla kesici uç başına plazma borlamanın maliyetinin %5 ek maliyet getirdiği değerlendirildiğinde takım ömrünün üç kata çıkması ile Ti-6Al-4V titanyum alaşımının işleme maliyetinin düşmesine büyük katkı sağlanacağı değerlendirilmektedir.

4.2 Öneriler

Bu çalışmanın üzerine eklenebilecek ileri çalışmalar olarak ise aşağıda belirtilen araştırmaların yapılabileceği değerlendirilmektedir:

- Aşınma testlerinin tornalamada da yapılabileceği,

- Plazma borlamada oluşan faz özelliklerinin incelenebileceği,

- Aşınma testleri sonrasında kesici takımlarda çatlak oluşup oluşmadığının da incelenebileceği,

- Gaz karışım oranı da değiştirilerek örneğin %5 BF_3 , %45 Argon, %50 H_2 veya %15 BF_3 , %35 Argon, %50 H_2 den oluşan karışım oranlarında yapılan plazma borlamanın kesme performansına etkilerinin incelenebileceği,

- Plazma nitrürleme ile plazma borlamanın değişik kombinasyonlarda beraber yapılarak bunun kesme performansına etkilerinin incelenebileceği,

- Plazma borlama işleminin HSS, WC freze takımlarına ve diğer takım malzemelerine de uygulanarak sertlik ve takım ömrüne etkilerinin araştırılabileceği değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak yukarıda belirtildiği üzere, plazma borlama işlemi tungsten karbür kesici (WC) uçlara başarıyla uygulanmış ve talaş kaldırma performansı açısından oldukça iyi sonuç elde edilmiştir. Dünyada borlamanın değişik yöntemleri üzerinde özellikle son yıllarda artan bir şekilde araştırmalar yapılmaktadır. Cevher olarak dünya bor rezervinin yaklaşık %72'sine sahip olan ülkemizde ise borlama işleminin teknolojik altyapısını oluşturan araştırmaların oldukça az olduğu gözlenmektedir. Özellikle ileri malzeme biliminin ilgi alanına giren ve uydu ve uzay çalışmalarında da gerek malzeme, gerekse de yakıt olarak geniş bir kullanım yelpazesi olan bor ve bor bileşikleri ile ilgili araştırmaların artmasının gerektiği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Ufuk Özdemir, Muzaffer Erten,** 2006. Plazma nitrürlenmiş sert metal plaketlerde performans araştırması, *İTÜ Dergisi/d Mühendislik,* Cilt:**5**, Sayı:1, Kısım:1, sf. 127-138.

[2] **Rie, K.-T.,** 1999. Recent Advances in Plasma Diffusion Processes, *Surface and Coatings Technology,* **112**, pp. 56-62.

[3] **Davis, J.A., Wilbur, P.J., Williamson, D.L., Wei, R., and Vajo, J.J.,** 1998. Ion Implantation Boriding of Iron and AISI M2 Steel Using a High-Current Density, Low Energy, Broad-Beam Ion Source, *Surface and Coatings Technology,* **103**, pp. 52-57.

[4] **Iakovou, R., Bourithis, L., and Papadimitriou, G.,** 2002, Synthesis of Boride Coatings on Steel Using Plasma Transferred Arc (PTA) Process and its Wear Performance, *Wear,* **252**, pp. 1007-1015.

[5] **Bourithis, L., Papaefthymiou, S. and Papadimitriou, G.D.,** 2002. Plasma Transferred Arc Boriding of a Low Carbon Steel: Microstructure and Wear Properties, *Applied Surface Science,* **200**, pp. 203-218.

[6] **Kaestner, P., Olfe, J., Rie, K.-T.,** 2001. Plasma-assisted boriding of pure titanium and TiAl6V4, *Surface and Coatings Technology*, **142-144**, pp. 248-252.

[7] **Rodriguez Cabeo E., Laudien G., Biemer S., Rie K.-T., Hoppe S.,** 1999. Plasma-assisted boriding of industrial components in a pulsed d.c. Glow discharge, *Surface and Coatings Technology*, **116-119,** pp. 229-233.

[8] **M. Darabara, G.D. Papadimitriou, L. Bourithis**, 2007. Tribological evaluation of Fe-B-TiB2 metal matrix composites, *Surface and Coatings Technology*, doi:10.1016/j.surfcoat.2007.05.023.

[9] **Qin, L., Qu, JZ., Lin, NM., Fan, AL., Chang, DQ., Tang, B.**, 2006. Plasma boronizing of Ti6Al4V using solid precursors by double glow plasma alloying technique, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **16**, pp. 2082-2085, Sp.Iss. 3 Dec.

[10] **Sarper, S.S.,** 2004. Borlamanın Demir Esaslı T/M Parçaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, *Doktora Tezi*, CBÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.

[11] **Bozkurt, N.,** 1984. Bor Yayınımıyla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme *Doktora Tezi*, İ.T.Ü., Fen Bil. Enst., İstanbul.

[12] **Göy, Z.,** 1984. Borlama, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bil.Enst., İstanbul.

[13] **Pengxun, Y.,** 1992. Gaseous boronizing with solid boron-yielding agents, *Thin Solid Films*., Vol. **214**, pp. 44-47, June 30.

[14] **Şahin, S.,** 1999. Katı Borlama Yöntemiyle Ferrobor Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi, *Doktora Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.

[15] **Kunst, H., and Schaaber, O.,** 1967. Beobachtungen Beim Oberflächen Borieren Von Stahl III, *HTM.22 Heft,* Vol. **4**, pp. 275 – 292.

[16] **Fichtl, W.,** 1981. Boronizing and its Practical Application, *Materials in Engineering,* **2**, pp. 276-286.

[17] **Selçuk, B.,** 1994. Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *Doktora Tezi,* E. Ü. Fen Bil. Enst., Kayseri.

[18] **Matuschka, A.G.,** 1980. *Boronizing*, Carl Hanser, Verlag.

[19] **Bazille, P.,** 1977. Connaissances Actuelles Sur La Boruratiyon, *Traıtement Thermique,* **111**, pp. 31-38.

[20] **Sinha, A. K.,** 1991. Heat Treating, *ASM Handbook*, Vol. 4, pp. 437-447.

[21] **Rile, M.,** 1974. Reasons for the Formation of Cracks in Boride Coatings on Steel, *Met. Sci. Heat Treat.*, **16**, pp. 836-839.

[22] **Babushkin, B. V.,** 1973. Polyakov, B. Z., Residual Stresses in Steel After Boriding From Melts, *Met. Sci. Heat Treat.,* Vol. **15**, pp. 577-580.

[23] **Krzyminski, H., and Kunst, H. T.,** 1973. Borieren Refraktarer Metalle, *Harterei Tecnische Mitteilungen*, Vol. 28**,** pp. 100-112.

[24] **Budinski, K.G.,** 1993. The Wear of Diffusion Treated Surfaces, *Wear*, **162-164**, pp. 757-762.

[25] **Hegewaldt, F., Singheiser, L., and Türk, M.,** 1984. Gasborieren, *HTM*, 39, pp. 1-15.

[26] **Bindal, C.,** 1991. Az Alaşımlı Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzeye Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tespiti, *Doktora Tezi*, İTÜ.

[27] **Eyre, T.S.,** 1975. Effect of Boronizing on Friction and Wear of Ferrous Metals, *Wear,* **33**, pp. 383-397.

[28] **Hunger, H.-J. and True G.,** 1994. Boronizing to Produce Wear-resistant Surface Layers, *Heat Treatment of Metals*, **2**, pp. 31-39.

[29] **Genel, K., Özbek, İ. and Bindal, C.,** 2003. Kinetics of Boriding of AISI W1 steel, *Materials Science and Engineering A,* **347**, pp. 311-314.

[30] **Kulka, M. and Pertek, A.,** 2003. The importance of carbon content beneath ironborides after boriding of chromium and nickel-based low-carbon steel, *Applied Surface Science*.

[31] **Genel, K., Ozbek, I., Kurt, A. and Bindal, C.,** 2002. Boriding Response of AISI W1 Steel and Use of Artificial Neural Network for Prediction of Borided Layer Properties, *Surface and Coatings Technology* **160**, pp. 38-43.

[32] **Nam, K.S., Lee, K.H., Lee, S.R., and Kwon, S.C.,** 1998. A Study on Plasma-Assisted Boriding of Steels, *Surface and Coatings Technology,* **98**, pp. 886-890.

[33] **Wilbur, P.J., Davis, J.A., Williamson, D.L., Vajo, J.J. and Wei R.,** 1997. High-Current Density Broad-Beam Boro Ion Implantation, *Surface and Coatings Technology,* **96**, pp. 52-57.

[34] **Yan, P.X., Wei, Z.Q., Wen, X.L., Wu, Z.G., Xu, J.W., Liu,W.M. and Tian, J.,** 2002. Post Boronizing Ion Implantation of C45 Steel, *Applied Surface Science,* **195**, pp. 74-79.

[35] **Yu, L.G., Khor, K.A., and Sundararajan, G.,** 2002. Boriding of Mild Steel Using the Spark Plasma Sintering (SPS) Technique, *Surface and Coatings Technology,* **157**, pp. 226-230.

[36] **Yücel, O.,** 1992. Karbotermik Ferrobor Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü., Fen Bil. Enst., İstanbul.

[37] **Goeuriot, P.Y., Fillit, P., Thevenot, F., Driver, S. H., and Bruyas, H.,** 1982. The Influence of Alloying Element Addition on the Boriding of Steels, *Mat. Sci. and Eng.,* **9**, – pp. 19.

[38] **W. Muhammad, K. Hussain, A. Tauqir, A. Ul Haq and A.Q. Khan,** 1999. Evaluation of Halide-Activated Pack Boriding of INCONEL 722, *Metallurgical and Materials Transactions,* **30A,3,** Academic Research Library, pp. 670-675, Mar.

[39] **Andrej Salak, Herbert Danninger and Marcela Selecka,** 1999. Powder Metallurgy Steels can be Borided, *Advanced Materials&Processes*, Vol. **156**, Issue 2, PH5, 1p, Aug.

[40] **W.D. Man, J.H. Wang, Z.B. Ma and C.X. Wang,** 2003. Plasma Boronitriding of WC(Co) Substrate as an effective Pretreatment Process for Diamond CVD, *Surface&Coatings Technology*, **171**, pp. 241-246.

[41] **P. Gopalakrishnan, P. Shankar, M. Palaniappa and S.S. Ramakrishnan,** 2002. Interrupted Boriding of Medium-Carbon Steels, *Metallurgical and Materials Transactions,* **33A,5**, Academic Research Library, pp. 1475-1485, May.

[42] **C.L. Ge and R.C. Ye,** 2002. Research on Self-Propagating Eutectic Boriding, *Journal of Materials Peocessing Technology*, **124**, pp. 14-18.

[43] **Nikolay Uzunov And Radoslav Ivanov,** 2004. Aluminothernic Powder Boriding of Steel, *Applied Surface Science*, **225**, pp- 72-77.

[44] **L. Lin And K. Han,** 1998. Optimization of Surface Properties by Flame Spray Coating and Boriding, *Surface&Coatings Technology*, **106**, pp. 100-105.

[45] **Bartsch, K., Leonhardt, A.,** 1999. Formation of iron boride layers on steel by d.c.-plasma boriding and deposition processes, *Surface and Coatings Technology*, **116-119**, pp. 386-390.

[46] **Nam, Kee-Seok, Lee, Ku-Hyun, Lee, Deuk Yong, Song, Yo-Seung,** 2005. Metal surface modification by plasma boronizing in a two-temperature-stage process, *Surface and Coatings Technology*, **197,** pp. 51-55.

[47] **Hunger, H.-J., and Löbig, G.,** 1997. Generation of boride layers on steel and nickel alloys by plasma activation of boron trifluoride, *Thin Solid Films,* **310,** pp. 244-250.

[48] **Hunger, Hans-Jorg, Löbig, Gunter, Trute**, **Gerhard,** 2001. Process for producing wear-resistant boride layers on metallic material surfaces, *United States Patent,* No: 6306225.

[49] **Cabeo, Emilio Rodriguez, Laudien, Günter, Rie, Kyong-Tschong, Biemer, Swen,** 2004. Method and Arrangement for Plasma Boronizing, *United States Patent,* No: 6783794.

[50] **Yu J., and Matsumoto S.**, 2004. Growth of cubic boron nitride films on tungsten carbide substrates by direct current jet plasma chemical vapor deposition, *Journal of Materials Research*, **19(5)**, pp. 1408-1412, May.

[51] **M. Usta, I. Ozbek, M. Ipek, C. Bindal, A.H. Ucisik**, 2005. The characterization of borided pure tungsten, *Surface and Coatings Technology*, **194**, pp. 330-334.

[52] **K.G. Anthymidis, D.N. Tsipas and E. Stergioudis**, 2001. Boriding of titanium alloys in a fluidized bed reactor, *Journal of Materials Science Letters*, **20**, pp. 2067-2069.

[53] **K.A. Khor, L.G. You, G. Sundararajan**, 2005. Formation of tungsten boride layer by spark plasma sintering boriding, *Thin Solid Films*, **478**, pp. 232-237.

[54] **Winfried Grafen and Bernd Edenhofer**, 2005. New developments in thermo-chemical diffusion processes, *Surface and Coatings Technology*, **200**, pp. 1830-1836.

[55] **Xueliang Qiao, H.-R. Stock, A. Kueper, C. Jarms**, 2000. Effects of $B(CH_3O)_3$ content on a PACVD plasma-boriding process, *Surface and Coatings Technology*, **131**, pp. 291-293.

[56] **Sudeep Abraham, Jung Tae Ok, Kwang Ho Kim**, 2000. The effect of deposition temperature and boron addition in Ti-B-C-N films deposited by plasma-enhanced chemical vapor deposition, *Journal of Materials Processing Technology*, **18-188**, pp. 571-574.

[57] **I. Uslu, H. Comert, M. Ipek, O. Ozdemir, C. Bindal**, 2007. Evaluation of borides on AISI P20 steel, *Materials and Design*, **28**, pp. 55-61.

[58] **I. Uslu, H. Comert, M. Ipek, F.G. Celebi, O. Ozdemir, C. Bindal**, 2007. A comparison of borides formed on AISI 1040 and AISI P20 steels, *Materials and Design*, **28**, pp. 1819-1826.

[59] **R. Ribeiro, S. Ingole, M. Usta, C. Bindal, A.H. Ucisik, H. Liang**, 2007. Tribological investigation of tantalum boride coating under dry and simulated body fluid conditions, *Wear*, **262**, pp. 1380-1386.

[60] **Z. Zakhariev, M. Marinov, T. Penyashki, Pl. Tsokov**, 2007. Simultaneous powdery boronaluminizing of steel stable in aluminum melts, *Journal of Alloys and Compounds*, doi:10.1016/j.jallcom.2007.05.017.

[61] **Shu Qin and Allen McTeer**, 2007. Characterization and optimization of a plasma doping process using a pulsed RF-excited B2H6 plasma system, *Surface and Coatings Technology*, **201**, pp. 6759-6767.

[62] **C. Bindal and A.H. Ucisik**, 2007. Characterization of boriding of 0.3% C, 0.02% P plain carbon steel, *Vacuum*, doi:10.1016/ j.vacuum.2007. 04.039.

[63] **C.K.N. Oliveira, C.L. Benassi, L.C. Casteletti**, 2006. Evaluation of hard coatings obtained on AISI D2 steel by thermo-reactive deposition treatment, *Surface and Coatings Technology*, **201**, pp. 1880-1885.

[64] **C. Li, M.S. Li, Y.C. Zhou**, 2007. Improving the surface hardness and wear resistance of Ti3SiC2 by boronizing treatment, *Surface and Coatings Technology*, **201**, pp. 6005-6011.

[65] **Asthana, P., Liang, H., Usta, M., Ucisik, A.H.,** 2007. Wear and surface characterization of boronized pure iron, *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, **129** (1), pp. 1-10, Jan.

[66] **O. Allaoui, N. Bouaouadja, G. Saindernan**, 2006. Characterization of boronized layers on a XC38 steel, *Surface and Coatings Technology*, **201**, pp. 3475-3482.

[67] **Hüseyin Çelikkan, M. Kemal Öztürk, Hasan Aydin, Mehmet Levent Aksu**, 2007. Boriding titanyum alloys at lower temparetures using electrochemical methods, *Thin Solid Films*, **515**, pp. 5348-5352.

[68] **Sukru Taktak**, 2007. Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels, *Materials and Design*, **28**, pp. 1836-1843.

[69] **I. Campos, G. Ramirez, U. Figueroa, J. Martinez, O. Morales**, 2007. Evaluation of boron mobility on the phases FeB, Fe2B and diffusion zone in AISI 1045 and M2 steels, *Applied Surface Science*, **253**, pp. 3469-3475.

[70] **I. Campos, G. Ramirez, C. Villa Velazquez, U. Figueroa, G. Rodriguez**, 2007. Study of microcracks morphology produced by Vickers indentation on AISI 1045 borided steels, *Materials Science and Engineering A,* doi:10.1016/j.msea.2007.04.052.

[71] **Tamer, O.M.,**. 1996. İyon nitrürleme ile sıcak dövme kalıplarının ömrünün arttırılması, *Doktora Tezi,* İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 95s, İstanbul.

[72] **Ali Başaran**, 2007. Toz Metal Parçalara Isıl ve Mekanik Yüzey İşlemlerin Birlikte Uygulanabilirliğinin Araştırılması, *Doktora Tezi,* SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

[73] **Pye, D.,** 2003. *Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing*, ASM International, p. 253, USA.

[74] **Balçık, H.,** 1998. İyon nitrürlenmiş H13 sıcak iş çeliğinin sıcaklık ve zaman ile sertlik değerlerinin değişimi, *Doktora Tezi,* İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 90s., İstanbul.

[75] **Yusuf Altintas,** 2000. *Manufacturing Automation*, Cambridge University Press.

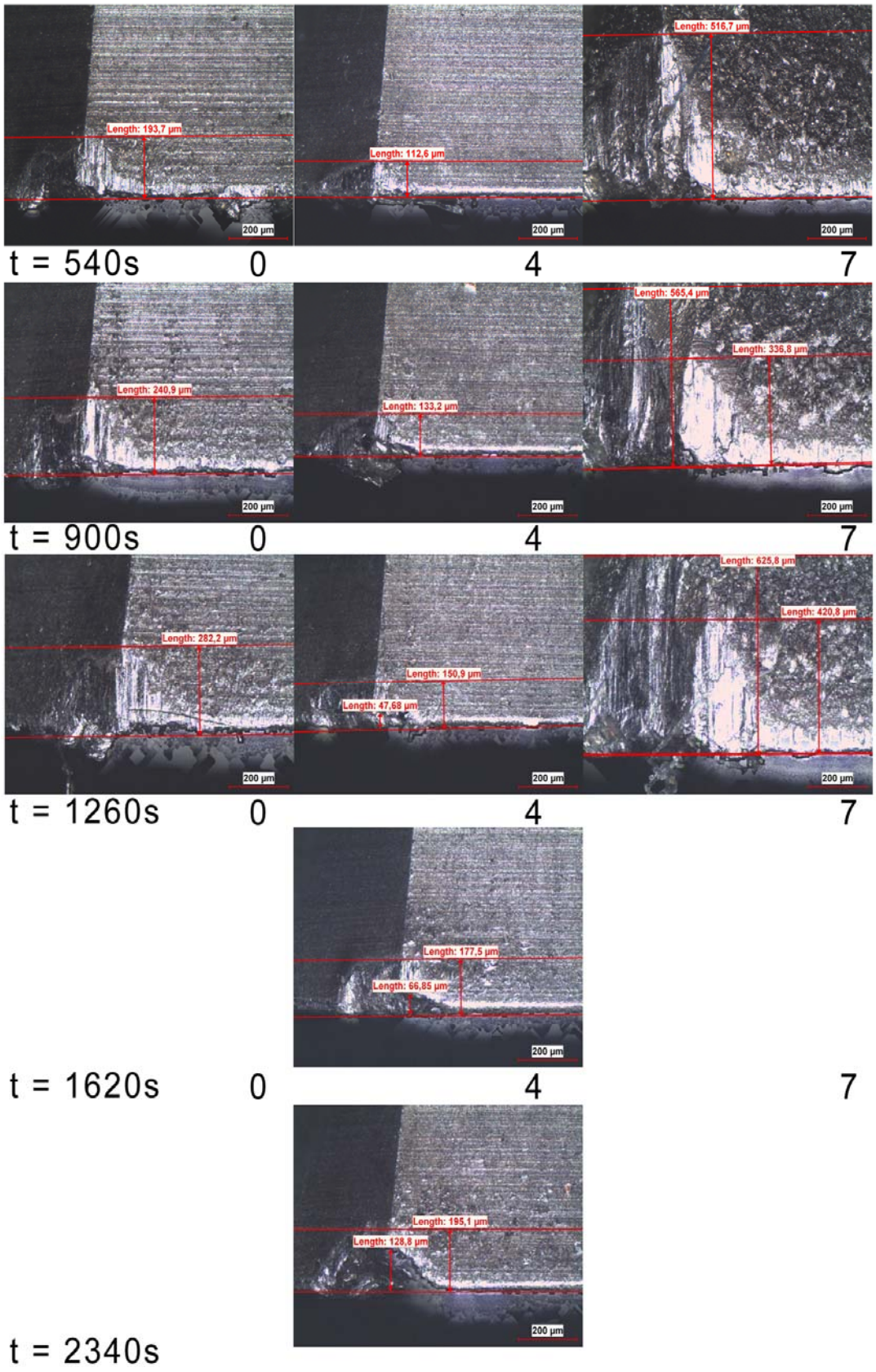
[76] **AKKO,** 2009. *Alın ve Köşe Freze Takım Kataloğu*, s. 92.

[77] **Zoran Janjuševıć, Zvonko Gulıšıja, Marija Mihailović, Aleksandra Patarić,** 2009. The Investigation of Applicability of The Hollomon-Jaffe Equation on Tempering The HSLA Steel, *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly,* **15** (3), pp. 131−136.

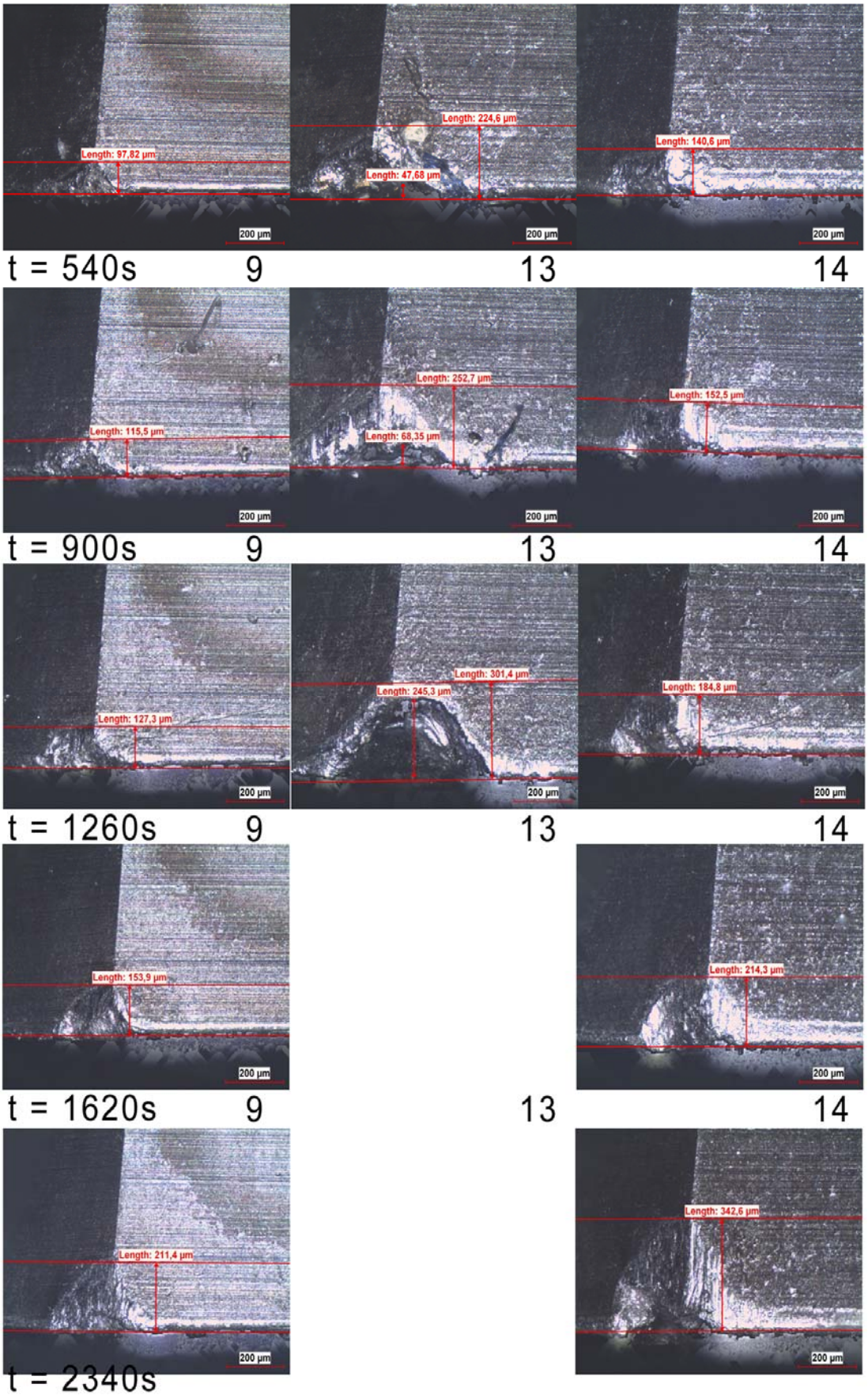
EKLER

EK A : Kesici Uçlar Optik Mikroskop Görüntüleri

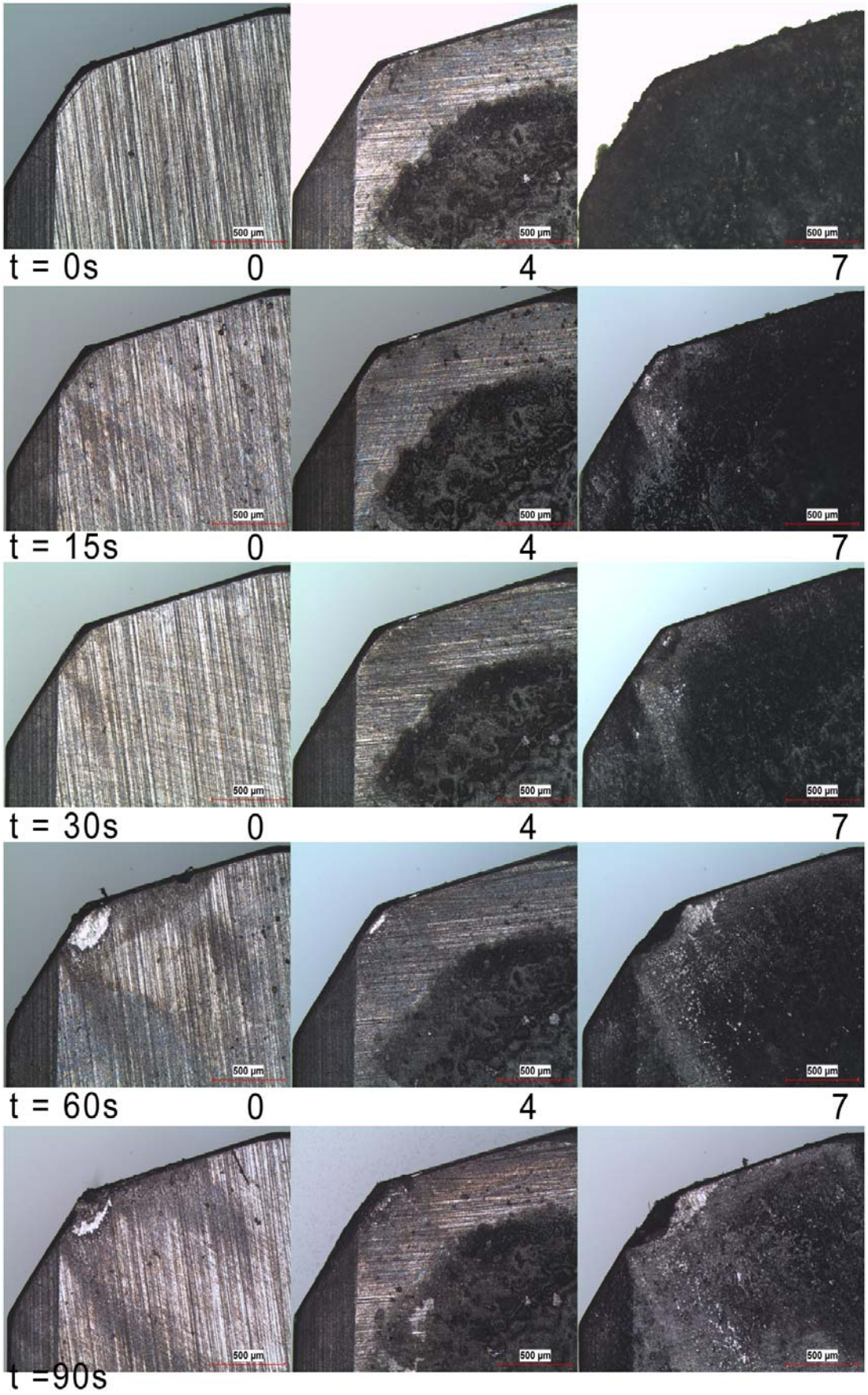
EK A



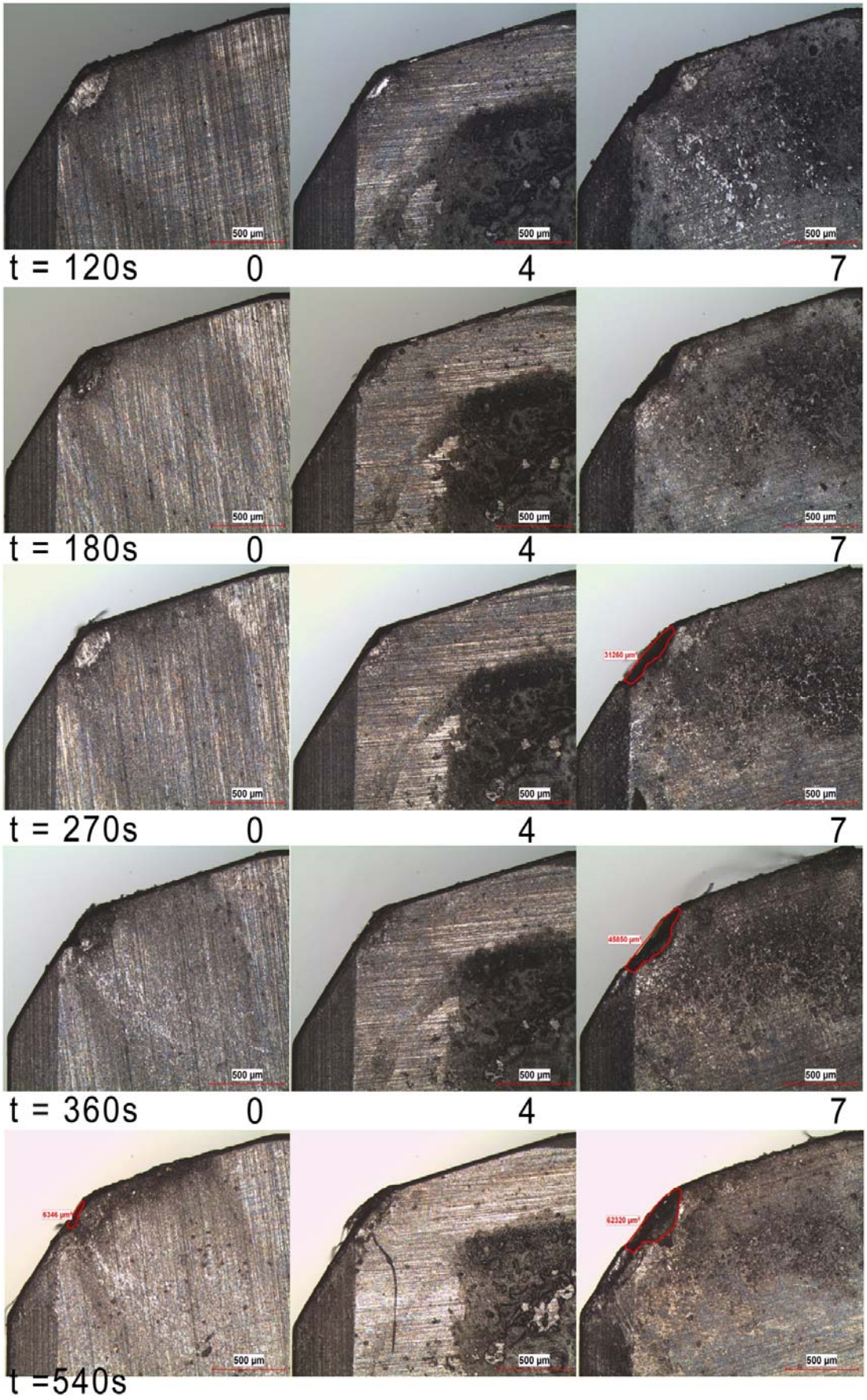
Şekil A.1 : 0, 4 ve 7 numaralı uçların serbest yüzey optik mikroskop görüntüleri.



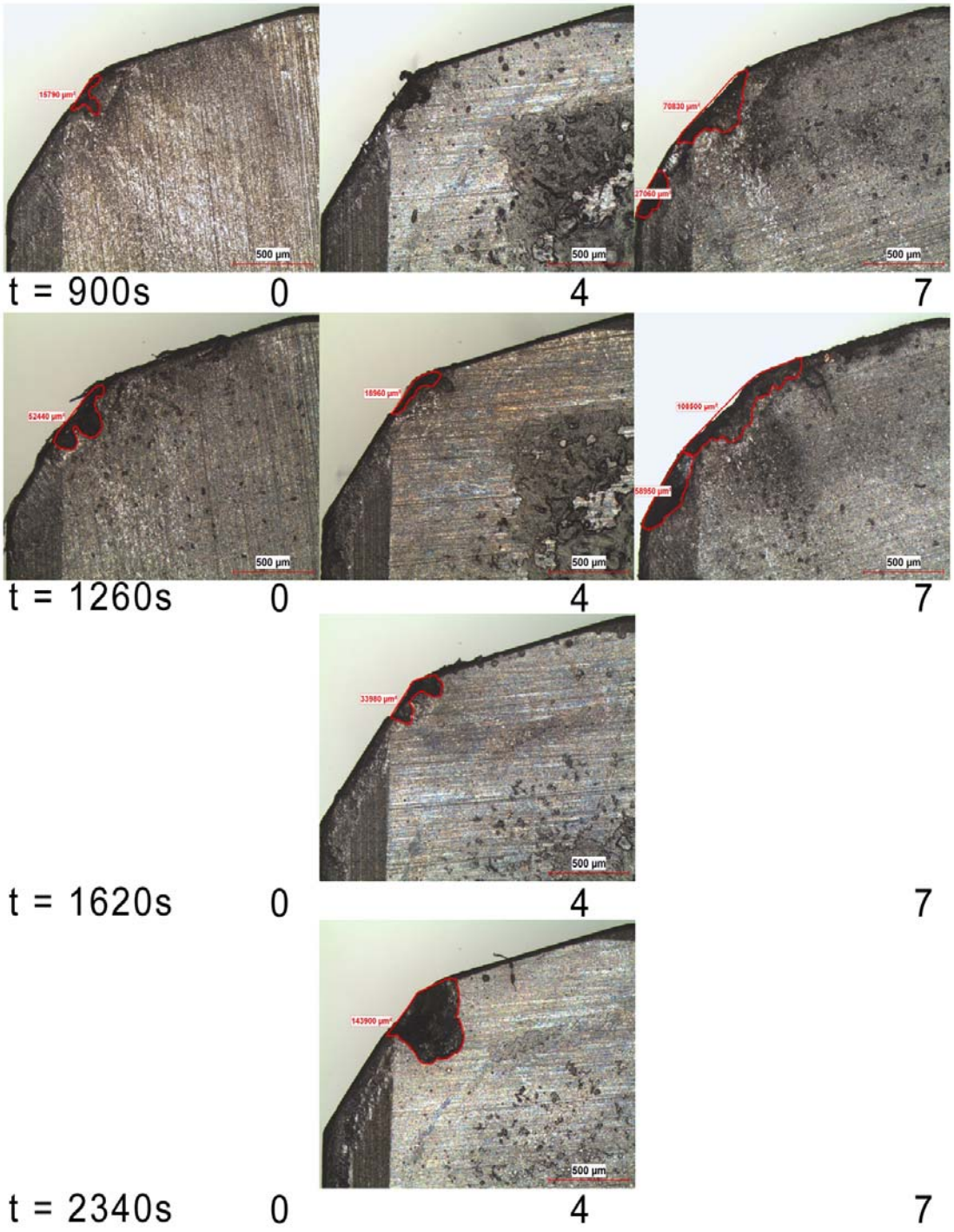
Şekil A.2 : 9, 13 ve 14 nu.lı uçların serbest yüzey optik mikroskop görüntüleri.



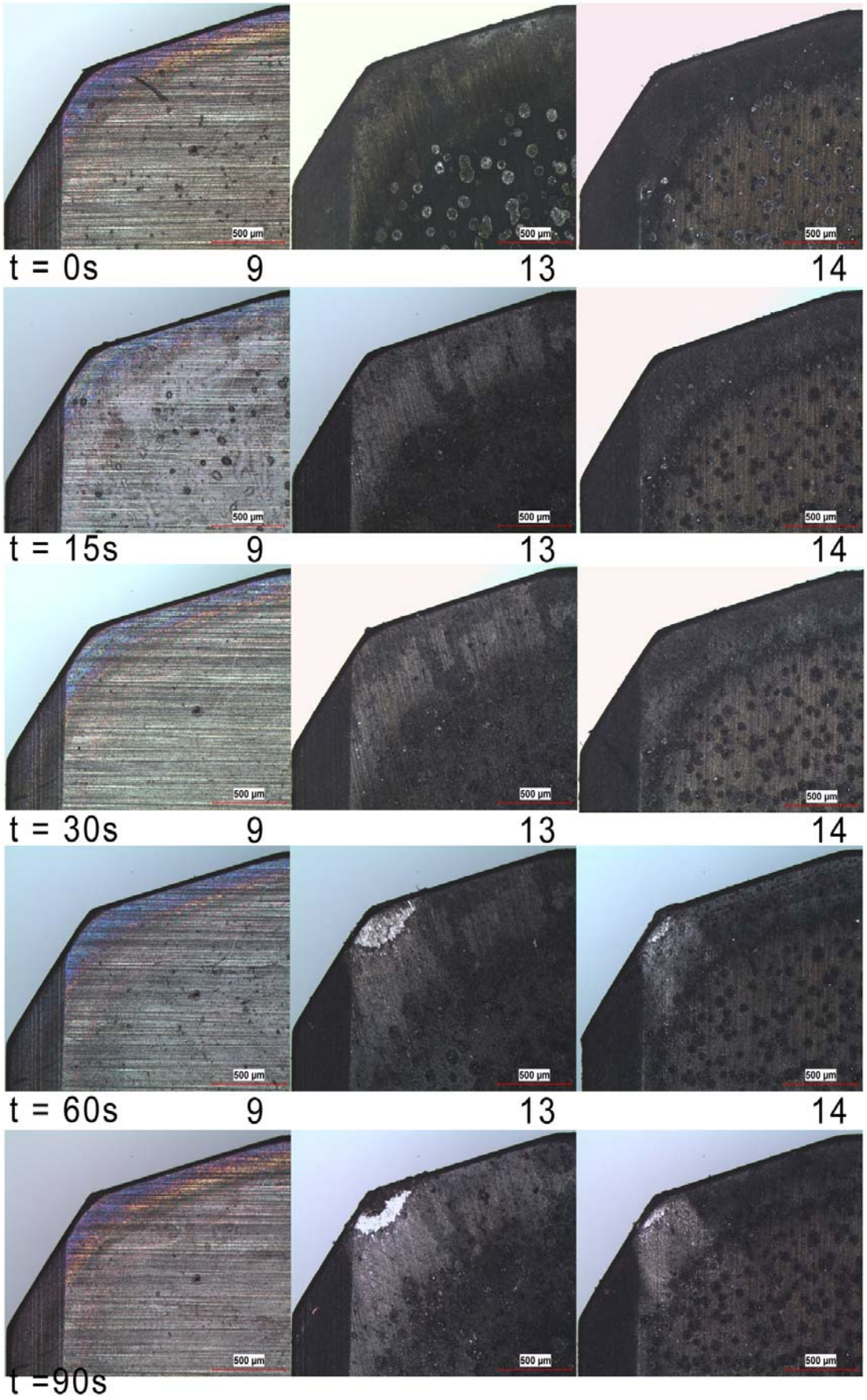
Şekil A.3 : 0, 4 ve 7 numaralı uçların talaş yüzeyi görüntüleri (0-90 sn).



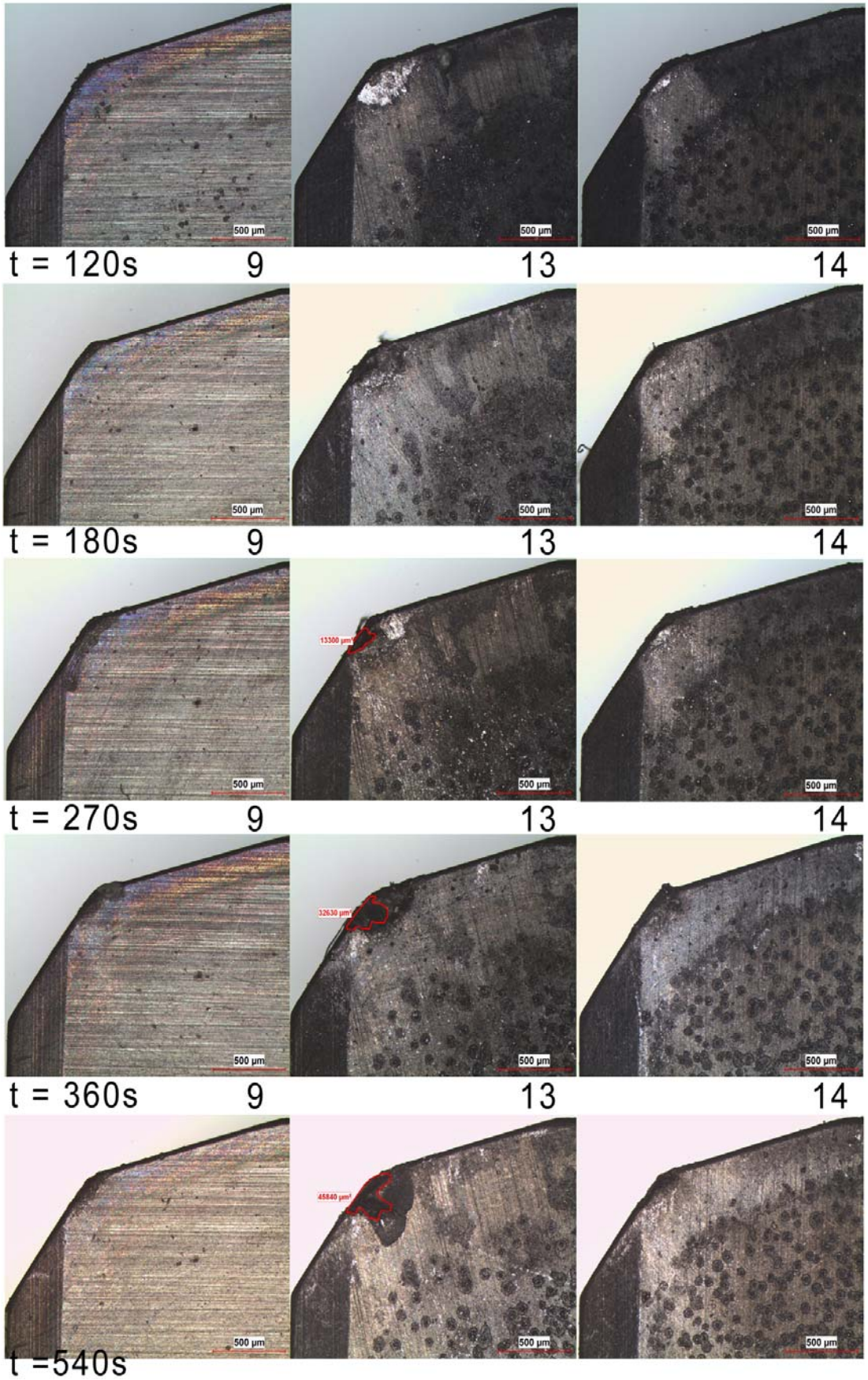
Şekil A.4 : 0, 4 ve 7 numaralı uçların talaş yüzeyi görüntüleri (120-540 sn).



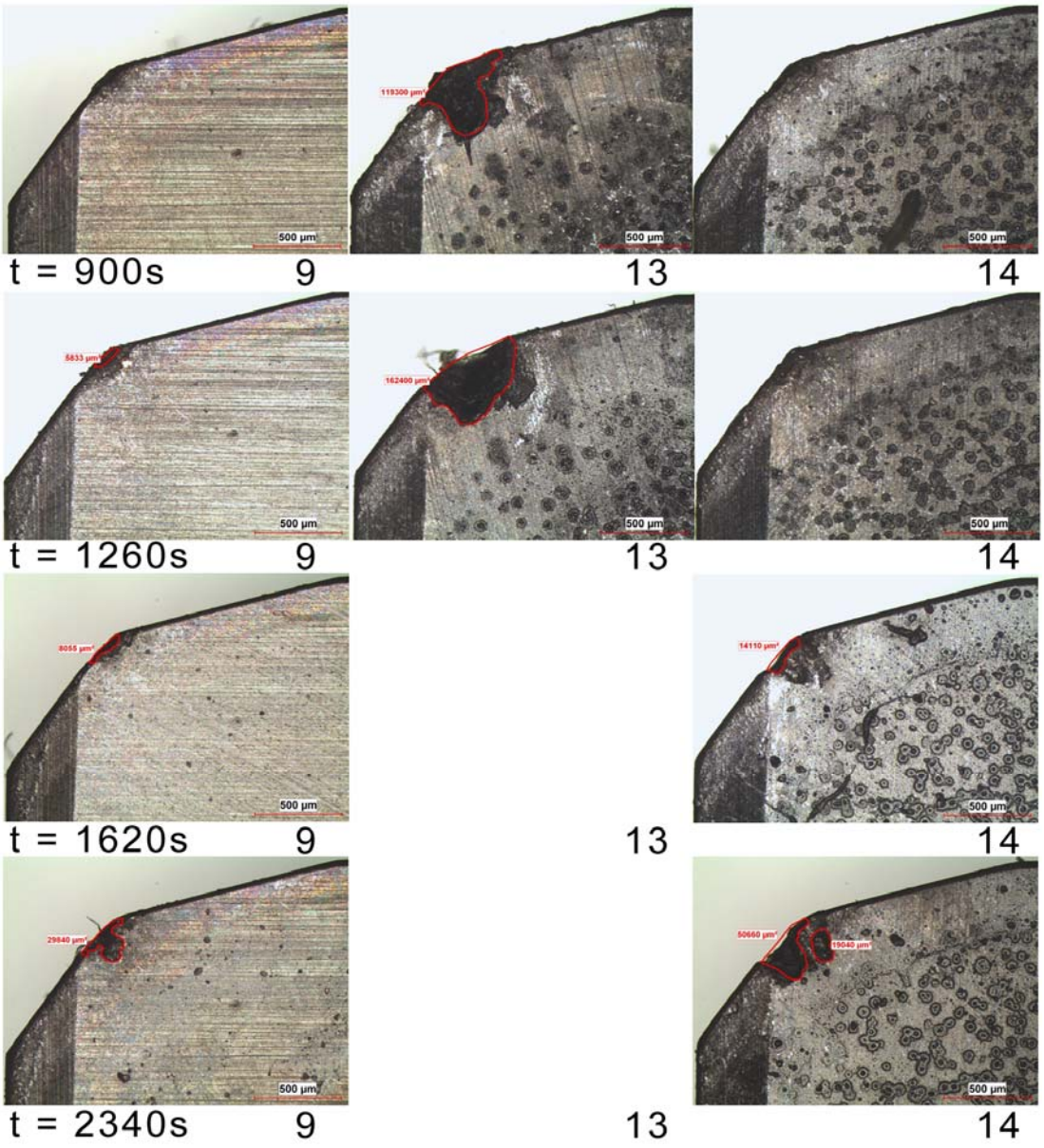
Şekil A.5 : 0, 4 ve 7 numaralı uçların talaş yüzeyi görüntüleri (900-2340 sn).



Şekil A.6 : 9, 13 ve 14 numaralı uçların talaş yüzeyi görüntüleri (0-90 sn).



Şekil A.7 : 9, 13 ve 14 numaralı uçların talaş yüzeyi görüntüleri (120-540 sn).



Şekil A.8 : 9, 13 ve 14 numaralı uçların talaş yüzeyi görüntüleri (900-2340 sn).

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Süleyman BAŞTÜRK

Doğum Yeri ve Tarihi: Niğde, 1973.

Adres: Hava Harp Okulu, HUTEN Md.lüğü, 34149, Yeşilyurt/İstanbul.

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Müh. 1993.

Yüksek Lisans Üniversite: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Müh. 1999.

Yayın Listesi:

- **Süleyman Baştürk**, Muzaffer Erten, Turgut Gülmez, 2009. Plazma (İyon) Borürlemenin Kesici Uçlar (Plaketler) Üzerindeki Etkisi, *V. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, MATİT 2009*, Konya, 17–18 Ekim 2009, s.23–32.

- **Süleyman Baştürk**, 2009. Computer Aided Part Program Generation for a Laser Cutting Machine, *Journal of Naval Science and Engineering*, Voulume **5**, No 2, pp. 75-88, August.

- Başaran, A., Varol, R., Pirge, G., **Baştürk, S.**, Varol, H., 2007. Bilyalı Dövme İşlemi ve Yüksek Sıcaklığın, Bakır İlaveli Toz Metal Çelik Parçaların Yorulma Dayanımına Etkisi, *Uluslar Arası Kırılma Konferansı,* 7-9 Kasım 2007. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- **S.Baştürk**, M.Erten, 2005. Borlama İle Yüzey Sertleştirme Çalışmaları, *III. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, MATİT 2005*, Konya, 16–17 Eylül 2005, s.237–251.

- G. Pirge, A. Arısoy, **S. Baştürk**, S. Altıntaş, 2004. NiMnGa Manyetik Şekil Hafızalı Malzemelerin Karakterizasyonu ve Performans Testleri için Test Tezgahı Tasarımı, *Havacılıkta İleri Teknolojiler ve Uygulamaları Sempozyumu*, *HİTEK 2004,* 9-10 Aralık 2004.