

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN SÜPER ALAŞIM TALAŞLI İMALAT
PERFORMANSLARINA BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Rifat YILMAZ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

EYLÜL 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN SÜPER ALAŞIM TALAŞLI İMALAT
PERFORMANSLARINA BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Rifat YILMAZ
(506111427)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU

EYLÜL 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506111427 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Rifat YILMAZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN SÜPER ALAŞIM TALAŞLI İMALAT PERFORMANSLARINA BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erdem ATAR
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Teslim Tarihi : **1 Eylül 2014**
Savunma Tarihi : **12 Eylül 2014**

Sevdiğime,

ÖNSÖZ

Son yıllarda havacılık sektöründe kullanılan uçak motorlarında verimlilik ve düşük yakıt tüketimi giderek daha fazla önem kazanmaya başlamıştır. Uçak motorlarında verimlilik artışı ancak yüksek gaz türbin giriş sıcaklığı ve basıncı ile mümkün hale gelmektedir. Bu nedenle araştırmacılar süper alaşımlar gibi yüksek sıcaklık özellikleri iyi olan malzemeleri geliştirerek türbin ve yanma odası parçalarında kullanmak suretiyle motor verimliliğini artırmaya çalışmışlardır.

Süper alaşımların; yüksek sıcaklık mukavemeti, iyi bir sürünme dayanımı ve düşük ısı iletkenlik katsayısı gibi bir çok mekanik ve fiziksel özelliği bünyesinde taşıması, bu özel alaşımların talaşlı imalatını da zor ve maliyetli bir hale getirmektedir. Frezeleme ve tornalama gibi geleneksel talaşlı üretim yöntemlerinde genellikle seramik ve karbür esaslı kesici takımların kullanılmasına rağmen süper alaşımlar için takım aşınmaları bir hayli yüksektir. Bu nedenle araştırmacılar ve takım üretici firmalar çeşitli kaplama tekniklerini geliştirerek kesici takımların yüzey özelliklerini iyileştirmeye çalışmışlardır. Bu kaplamalar ile takım ömürlerinde artış sağlanmış ve süper alaşım malzemelerin talaşlı imalatlarında maliyet azaltımı yapılabilmektedir. Günümüzde kesici takım kaplamaları çoğunlukla TiN, TiC, Al₂O₃, kübik bor nitrür (CBN) ve polikristalin elmas (PCD) gibi malzemelerin biriktirme metodları kullanılarak (ing. deposition methods) kesici takım üzerine uygulanmasını içermektedir. PVD (ing. Physical vapor deposition) ve CVD (ing. Chemical Vapor deposition) gibi biriktirme kaplamalarının yanı sıra; yaygın bir kullanımı olmamakla birlikte yüksek hız çeliği ve WC-Co sinterlenmiş karbür kesici takımlara; nitrürleme ve borlama gibi difüzyon ile yüzey sertleştirme teknikleri de uygulanabilmektedir. Bu tez çalışmasında da, süper alaşım talaşlı imalatında kullanılan WC-Co esaslı kesici takımların pasta borlama yöntemiyle talaşlı imalat performanslarının artırılması hedeflenmiştir.

Bu çalışmanın hazırlanmasında yardımlarını ve tecrübelerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU'na, borlama deneylerinde yol gösteren ve XRD çekimlerini yapan Met. Yük. Müh. Emre DİLEKTAŞLI'ya, deney sonuçlarının değerlendirilmesinde fikirleriyle ışık tutan Sayın Doç. Dr. Erdem ATAR'a, SEM fotoğraflarının çekimindeki desteklerinden ötürü Met. Yük. Müh. Dilek TEKER ve Uzman Ahmet Nazım'a, numune hazırlanmasında emeği geçen Tusaş Motor Sanayii metal laboratuvarı personeline, aşınma testlerinin gerçekleştirilmesinde desteğini esirgemeyen Mak. Müh. Yaşar SIR'a, manevi desteklerini esirgemeyen dostum Met. Yük. Müh. Ersu LÖKÇÜ'ye, iş arkadaşlarım Elektronik Müh. Soner ÖREN ve Met. Müh. Aydın YAĞMUR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2014

Rifat Yılmaz
(Malzeme & Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. KESİCİ TAKIMLAR, TAKIM AŞINMASI VE SÜPER ALAŞIMLARIN TALAŞLI İMALATI	5
2.1 Kesici Takım Malzemeleri.....	5
2.1.1 Takım çelikleri	6
2.1.2 Seramikler	6
2.1.3 Sermetler	6
2.1.4 Kübik bor nitrür (CBN).....	7
2.1.5 Polikristalin elmas.....	7
2.1.6 Sinterlenmiş karbürler	8
2.1.6.1 WC-Co	8
2.1.6.2 WC-Co-(TiC, TaC, NbC).....	13
2.2 Kesici Takımlarda Meydana Gelen Aşınmalar	13
2.3 Serbest Yüzey Aşınması	17
2.4 Diğer Aşınma Türleri	17
2.5 Süper Alaşımlar ve Talaşlı İmalatı.....	18
2.5.1 Demir bazlı süper alaşımlar	18
2.5.2 Kobalt bazlı süper alaşımlar.....	19
2.5.3 Nikel bazlı süper alaşımlar.....	19
2.6 Nikel Bazlı Süper Alaşımların İşlenebilirlik Problemleri.....	20
2.7 Nikel Bazlı Süper Alaşımların İşlenmesinde Kullanılan Takımlar ve Aşınma Tipleri.....	20
3. KESİCİ TAKIMLARA UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ.....	23
3.1 Biriktirme Kaplamaları	23
3.1.1 Kimyasal buhar biriktirme (CVD)	23
3.1.2 Fiziksel buhar biriktirme (PVD)	24
3.2 Difüzyon Kaplamaları.....	25
3.2.1 Nitrürleme	25
3.2.2 Borlama	26
3.3 Borlama Yöntemleri.....	27
3.3.1 Katı borlama.....	27
3.3.2 Sıvı borlama	28
3.3.3 Gaz borlama	28
3.3.4 Plazma borlama	29

3.3.5 Pasta borlama	29
3.4 WC-Co Kesici Takımlar Üzerine Yapılan Borlama ve Nitritleme Çalışmaları	29
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
4.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzeme	37
4.2 Borlama Yöntemi	38
4.2.1 Borlama parametreleri.....	41
4.3 Yapısal ve Mekanik Karakterizasyon Çalışmaları	41
4.3.1 Metalografik çalışmalar ve borür tabaka kalınlıklarının belirlenmesi ..	41
4.3.2 XRD ölçümleri	42
4.3.3 SEM çalışmaları ve EDX analizleri	43
4.3.4 Sertlik ölçümleri	43
4.3.5 Borür tabakalarına uygulanan yapışma testleri	44
4.4 Takım Aşınması Test Yöntemi	45
4.4.1 Aşınma (kesme) testi parametreleri.....	46
4.4.2 Aşınma Ölçümleri	46
5. DENEYSEL SONUÇLAR	49
5.1 Yapısal Karakterizasyon Sonuçları	49
5.1.1 Borür tabaka kalınlıkları.....	49
5.1.2 XRD faz analizi sonuçları	51
5.1.3 SEM çalışmaları ve EDX analizi sonuçları	54
5.2 Mekanik Karakterizasyon Sonuçları	57
5.2.1 Sertlik sonuçları.....	57
5.2.2 Yapışma testi sonuçları	59
5.2.2.1 Rockwell C (150 kg) yükteki sonuçlar.....	59
5.2.2.2 Rockwell A (60 kg) yükteki sonuçlar	61
5.3 Aşınma Sonuçları	61
6. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	67
EKLER.....	71
KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ	83

KISALTMALAR

Ar	: Argon
B	: Bor
C	: Karbon
W	: Tungsten
WC	: Tungsten Karbür
Co	: Kobalt
Fe	: Demir
Nb	: Niobyum
H	: Hidrojen
CBN	: Cubic Boron Nitride
PCD	: Poly Crystalline Diamond
CNC	: Computer Numerical Control
CVD	: Chemical Vapor Deposition
PVD	: Physical Vapor Deposition
ISO	: International Standard Organization
HV	: Vickers sertlik birimi
HRC	: Rockwell C sertlik birimi
HRA	: Rockwell A sertlik birimi
HSS	: High Speed Steel
SEM	: Scanning Electron Microscope
EDX	: Eletron Dispersive X-Ray Spectroscopy
Sfm	: Surface feed per minute
XRD	: X-Ray Diffraction
BUE	: Build up edge
GPa	: Giga pascal

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Bazı karbürlerin ergime sıcaklığı ve sertlikleri	12
Çizelge 4.1 : Borlama deneylerinde kullanılan parametreler	41
Çizelge 4.2 : Aşınma testlerinde kullanılan parametreler.....	46
Çizelge 5.1 : 900 °C - 8 saat borlanmış takımda elemental nokta analiz sonuçları ...	56
Çizelge A.1: Borür tabaka kalınlıkları.....	72
Çizelge C.1: Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerin Vickers sertlikleri	75
Çizelge D.1 : Kesici takım aşınma miktarları.....	76

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : WC kesici takımın tarihi gelişimi.....	9
Şekil 2.2 : W-C ikilisine ait faz diyagramı	10
Şekil 2.3 : WC-Co ikili sistemine ait faz diyagramı.....	11
Şekil 2.4 : WC-Co sinterlenmiş karbürün farklı Co içeriği ve WC tane boyutu için sıcaklığa bağlı sertlik değişimi.....	11
Şekil 2.5 : % 94 WC - % 6 Co içeren orta ve iri taneli WC-Co mikroyapısı (1500x)	12
Şekil 2.6 : % 85 WC - % 9 (Ta,Ti, Nb) C - % 6 Co, orta taneli yapı (başta), % 78 WC - % 15 (Ta,Ti, Nb) C - % 7 Co orta taneli yapı (ortada), % 73 WC - % 19 (Ta,T, Nb) C - % 8 Co orta taneli yapı (sonda)	13
Şekil 2.7 : % 0.4 C içeren bir çeliğin WC-Co ile işlenmesi sırasında ortaya çıkan krater aşınması	14
Şekil 2.8 : Kesici takım üzerinde talaş sıvanması aşınması (BUE).....	15
Şekil 2.9 : Yüksek hız ve ilerlemede karbür kesici takımda meydana gelen çukurlaşma (solda), deformasyon (solda)	15
Şekil 2.10 : Nikel esaslı bir alaşımın düşük hızda işlenmesi sırasında kesme kenarında meydana gelen termal çatlaklar (15x büyütmede).....	16
Şekil 2.11 : Nikel esaslı süper alaşımların karbür takımla işlenmesi esnasında meydana gelen çentik aşınması	16
Şekil 2.12 : Kesici takımda meydana gelen abrazyon kaynaklı serbest yüzey aşınması	17
Şekil 2.13 : a) Burun aşınması, b) Talaş vurması, c) Takım kırılması	18
Şekil 2.14 : Kesici takımlarda sıcaklığa bağlı sertlik değişimi.....	21
Şekil 3.1 : Katı borlama	27
Şekil 3.2 : Gaz borlama	28
Şekil 3.3 : Guobiao ve arkadaşlarının WC taneleri etrafında saptadıkları CoW ₂ B ₂ fazının SEM görüntüsü	31
Şekil 4.1 : Borlama deneylerinde kullanılan kesici takım geometrisi.	37
Şekil 4.2 : Borlama deneylerinde kullanılan kesici takım görüntüsü.	38
Şekil 4.3 : Borlama deneylerinde kullanılan halkalar ve refrakter	38
Şekil 4.4 : Etüvde kurutma sonrası borlama düzeneğinin görünüşü	39
Şekil 4.5 : Borlama işleminin yapıldığı tüp fırın.	39
Şekil 4.6 : Borlama sonrası pastanın kırılarak kesici takımların çıkarılması esnasındaki görüntü.....	40
Şekil 4.7 : Pasta borlama sonrası borlanmış kesici takımların görüntüsü	40
Şekil 4.8 : Sıcak bakalıte alınmış kesici takımın kesit görünüşü.....	42
Şekil 4.9 : Borür tabaka incelemesinde kullanılan SEM cihazı.....	42
Şekil 4.10 : XRD analizlerinde kullanılan cihaz	43
Şekil 4.11 : Borlanmış kesici takımların yüzey sertlik ölçümünde kullanılan Vickers sertlik cihazı.....	44

Şekil 4.12 : Kaplama yapışma kabiliyetini belirlemede kullanılan hasar tipleri skalası	45
Şekil 4.13 : Borlanmış takımların aşınma testlerinin yapıldığı iş parçası ve tezgah .	45
Şekil 4.14 : Inconel 718 şaft parçasının borlanmış takımlar ile denenmesi esnasında ortaya çıkan talaş geometrisi	46
Şekil 4.15 : Kesici takım aşınma ölçümlerinin yapıldığı stereo mikroskop.....	47
Şekil 5.1 : 900 °C sıcaklıkta ve 4 saat süre borlanmış kesici takımın optik mikroskopta 500x büyütmede borür tabaka kalınlığı.....	49
Şekil 5.2 : 900 °C sıcaklıkta ve 4 saat süre borlanmış kesici takımın 2000x büyütmede SEM görüntüsü	50
Şekil 5.3 : Borür tabaka kalınlığının sıcaklık ve süreye bağlı değişimi.	50
Şekil 5.4 : Borlanmamış kesici takıma ait XRD diyagramı.....	51
Şekil 5.5 : Borlanmamış ve farklı sıcaklıklarda 4 saat süreyle borlanmış WC-Co kesici takımlara ait XRD diyagramı.....	52
Şekil 5.6 : Borlanmamış ve farklı sıcaklıklarda 8 saat süreyle borlanmış WC-Co kesici takımlara ait XRD diyagramı.....	53
Şekil 5.7 : 900 °C sıcaklıkta ve 4 saat süre borlanmış kesici takımın 3000x büyütmede SEM görüntüsü	54
Şekil 5.8 : 900 °C sıcaklıkta ve 4 saat süre borlanmış kesici takımın 7000x büyütmede SEM görüntüsü	55
Şekil 5.9 : 900 °C - 8 saat borlanmış takımda elemental nokta analizi alınan noktalar	55
Şekil 5.10 : 1000 °C - 8 saat borlanmış takımda elemental çizgi analizi sonuçları. ..	57
Şekil 5.11 : 900 °C sıcaklıkta ve 4 saat süre borlanmış kesici takımın Vickers sertlik izi a) 1 kg yük altında b) 2 kg yük altında	58
Şekil 5.12 : Sertlik değerlerinin sıcaklık ve süreye bağlı olarak değişimi.....	59
Şekil 5.13 : Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerin 150 kg yük ile yapışma testi sonuçları.....	60
Şekil 5.14 : Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerin 60 kg yük ile yapışma testi sonuçları.....	62
Şekil 5.15 : Saha testleri sonucunda kesici takımların aşınma yüzeyleri (1. yüz).....	63
Şekil 5.16 : Aşınma testleri sonucu kesici takımlarda meydana gelen aşınma miktarları.....	64
Şekil A.1 : Borlanmış numunelerin SEM görüntüleri	73
Şekil B.1 : 800 °C 8 saat borlanmış takımda EDX çizgi analizi.....	74
Şekil B.2 : 900 °C 8 saat borlanmış takımda EDX çizgi analizi.....	74
Şekil B.3 : 1000 °C 8 saat borlanmış takımda EDX çizgi analizi.....	74
Şekil D.1 : Saha testleri sonucunda kesici takımların aşınma yüzeyleri (2. yüz)	77

KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN SÜPER ALAŞIM TALAŞLI İMALAT PERFORMANSLARINA BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİSİ

ÖZET

Bu çalışmada; Inconel 718 uçak motoru parçalarının torna operasyonlarında kullanılan WC-Co kesici takımlar farklı borlama parametreleri altında pasta borlama işlemine tabii tutulmuş, borlanan takımlar üzerinde yapısal-mekanik karakterizasyonlar gerçekleştirilmiş ve saha testleri yapılarak takım performansındaki değişimler tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaca yönelik olarak öncelikle literatür araştırması yapılmış ve WC-Co kesici takımlar üzerine yapılan difüzyon prosesleri incelenmiştir. Literatür çalışmalarından yola çıkılarak yapılan ön borlama deneyleri sonucu farklı sıcaklık ve sürelerden oluşan bir deney planı hazırlanmıştır. Buna göre 800, 850, 900, 1000 ve 1100 °C olmak üzere 5 farklı sıcaklık ile 4 ve 8 saat olmak üzere iki farklı sürede borlama işlemi yapılmıştır.

Borlama işlemi % 94 WC, % 6 Co içeren V yataklı bilenmiş yuvarlak kesici takım üzerine pasta uygulamak suretiyle argon koruyucu atmosferi altında tüp fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir. Borlanmış takımlarda borür tabaka kalınlığının ölçülmesi ve mikroyapı incelemesi için SEM kullanılmış; EDX modülü ile çizgi ve nokta taramalar yapılarak bor difüzyonu araştırılmıştır. Buna göre borür tabaka kalınlıklarının 6 ile 32 µm arasında değiştiği ve borun Co matris içerisine difüze ettiği anlaşılmıştır. Borür tabakasında oluşan fazların tespiti için kesici takımların XRD analizleri yapılmıştır. XRD sonuçları incelendiğinde kesici takım yüzeyinde oluşturulan borür tabakasında CoW₂B₂, CoW₃B₃, CoB ve W₂B fazlarının bulunduğu ve sertlik artışının da bu fazlar sayesinde meydana geldiği anlaşılmıştır. Oluşan fazların literatürdeki diğer borlama çalışmalarında elde edilen fazlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Elde edilen borür tabakalarının Vickers sertlik cihazında 1 ve 2 kg yük altında sertlik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Borlama sonucu altlık malzemesine göre sertlikte maksimum 511 ile 630 HV arasında artış sağlanmıştır. Borlanan kesici takımlarda borür tabakasının yapışma kabiliyeti ve gevrekliği, Rockwell adhezyon testi ile belirlenmiştir. Bu testte borür tabakası üzerinde 60 ve 150 kg yük altında Rockwell sertlik cihazı ile batma izi oluşturulmuştur. Bu izin etrafında meydana gelen çatlaklar ve dökülmeler incelenerek standard hasar görüntüleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre 60 kg yükte 1000 °C - 8 saat, 1100 °C - 4 saat, ve 1100 °C - 8 saat borlanmış numunelerin HF6 tipi hasara uğradığı görülmüştür.

Takımların aşınma testleri Tusaş Motor Sanayi bünyesindeki makina parkında yer alan HNK marka dik torna tezgahında, Inconel 718 süper alaşımından imal bir uçak motoru shaft parçasının tornalama operasyonunda gerçekleştirilmiştir. Aynı kesme parametreleri altında, borlanmış takımların birbirlerine ve borlanmamış takıma göre serbest yüzey aşınmalarının kıyaslaması yapılmıştır. Aşınma sonuçlarına göre borlanmamış takımındaki ortalama serbest yüzey aşınması 231 µm olmuştur. En az aşınan takım ise 800 °C sıcaklıkta 8 saat borlanmış takım olup ortalama aşınma miktarı 118 µm olarak ölçülmüştür.

Sonuç olarak pasta borlama işlemi WC-Co esaslı kesici takımlara başarı ile uygulanarak süper alaşım talaşlı imalat performanslarında % 48 iyileşme sağlanabilmiştir. Çalışma; dünya literatüründe çok az çalışılan borlanmış WC-Co kesici takımların süper alaşım işlemedeki performansının saha testleriyle araştırılması bakımından özgün bir özelliğe sahip olup, literatüre önemli bir katkı sağlaması ümit edilmektedir.

THE EFFECT OF BORIDING PROCESS ON SUPER ALLOY MACHINING PERFORMANCE OF CARBIDE CUTTING TOOLS

SUMMARY

Today, modern aircraft engines are designed by manufacturers considering low fuel consumption and emission. In order to achieve these requirements for high efficient aeroengines; turbine temperatures are increased by designers and engine manufacturers. So high temperature materials which exhibit excellent strength, creep resistance etc. must be used for hot section parts of aeroengines. Nickel based super alloys are commonly used for manufacturing of turbine blades, discs, combustion chamber and they have unique high temperature properties compare to other engineering materials.

Super alloy parts are generally manufactured by machining operations (turning, milling, grinding etc.) from forged raw materials. So, due to the mentioned mechanical properties of super alloys, cutting tool consumption is very high. In aviation industry, generally PVD or CVD overlay coated cemented carbide cutting tools are utilized for super alloy machining. Also, there are some academic studies on the diffusional coating of cutting tools like boriding & nitriding and good performance results could be obtained by researchers. Boriding, which is thermo chemical surface hardening method, provides attractive performance development for WC-Co cutting tools. In the literature, there are several boriding methods like pack, molten salt (with and without electrolysis), paste, gas and plasma boriding could be used by users. By the means of boride layers, treated surfaces would have high hardness, good tribological properties and anti-corrosion resistance.

In this study, WC-Co cutting tools used in turning operations of Inconel 718 superalloy aero engine components, were borided with different process parameters and then with the help of structural-mechanical inspections (SEM, EDX, XRD analysis, Vickers hardness test, Rockwell hardness test) and field tests (turning); change in the tool performances were investigated. For this purpose, firstly a literature survey was conducted and informations about diffusion processes of WC-Co cutting tools were gathered. Under the light of literature informations, pre-boriding experiments were realized and boriding parameters which consist of different temperatures and time intervals were planned. As a result, five different temperatures namely 800, 850, 900, 1000 and 1100 °C and two different time interval (4 and 8 hrs) have been used for boriding of cutting tools.

In the experiments, paste boriding method was used and experimental setup was prepared. Ekabor II paste (EkaGermany®) was used as boron agent and boriding process was realized by using grinded round inserts which are made from % 94 WC and % 6 Co under Argon (Ar) inert atmosphere in tube furnace. Before the boriding experiments, cutting tools were cleaned with the acetone and distilled water. After cleaning, cutting tools and boron paste were put into the plain carbon steel ring container and then this experimental setup was dried in the oven for 15 minutes.

For the inspection of borided cutting tools in order to find boride layer thickness, optical microscope was firstly used. But, because of sample polishing problems (edge rounding), layer thicknesses were determined by using SEM which can compensate sample preparation problems. As a result of SEM examinations, it is observed that the thickness of the boride layers were changing between 6 μm (800 °C - 8 hrs) and 32 μm (1100 °C - 8 hrs). According to these results boride layer thicknesses were risen with increasing temperature and time, because boriding is a diffusion controlled process and increase in temperature enhances diffusion capability/rate of the boron atom. Also boriding time was less effective on the boride layer thickness than temperature, because for same temperature, when time was increased, boride layer thickness haven't changed remarkably.

After determination of layer thicknesses, XRD analysis of boride layers were conducted. As a result of XRD patterns; for original cutting tool, only WC phase peaks were seen and there was no any Co phase peak observed due to the low amount of Co matrix (% 6). When the XRD pattern of borided cutting tools were considered, boride layer was consist of CoW_2B_2 , CoW_3B_3 , CoB and W_2B phases depending on boriding temperature and time. For borided cutting tools under 800 °C - 8 hrs, 850 °C - 4 hrs, 900 °C - 4 hrs parameter, there were not observed any boride phase peak except WC phase peak. It was not mean that there were not any boride phases in these cutting tools. Due to low amount of boride phases, XRD equipment could not detect any boride peaks for these cutting tools. On the other hand, cutting tool borided at 1100 °C - 8 hrs had CoB and W_2B phases, apart from others. According to XRD patterns, it is found that WC phase peak intensity decreased with increasing boriding temperature. On the contrary, peak intensities of CoW_2B_2 and CoW_3B_3 phases decreased with increasing boride temperature and time for borided cutting tools. In the literature, similar boride phases could be found by several researchers.

The detailed boron diffusion was investigated by EDX point and line elemental analysis. According to point EDX results, it was understood that boron diffuse into the Co matrix and formed boride phases between WC grains. In the point EDX analysis, carbon and boron EDX peaks were not distinguished exactly by equipment due to the atomic number similarity, so boron + carbon rich regions were accepted as boron diffusion regions in this thesis. In addition, line EDX results showed that there were two different region in the boride layer; first one was boron rich layer located near the outer surface of cutting tool and second one has low boron content which is called as diffusion layer close to substrate. We obtained that, boron concentration increased gradually from substrate to outermost surface of the borided cutting tools. These results were also compatible with literature.

Hardness of borided layers were tested in Vickers hardness device under 1 and 2 kg load. Borided cutting tools were not polished before hardness tests because of prevention boride layer removal. Although we haven't polished borided cutting tools, indentation was easily seen. During the hardness tests, six individual hardness results were realized for each borided cutting tools. Then average of these six individual hardness values for each load were calculated. After boriding, compared to substrate material; 511 to 630 HV harder boride layer was achieved. It is found that, increase in the hardness was caused by hard ternary boride phases (CoW_2B_2 and CoW_3B_3) which have orthorhombic crystal structure and high hardness (20 - 45 GPa). But decrease in the hardness at borided cutting tool under 1100 °C - 8 hrs came from low hardness of CoB phase (11 GPa) and fully consumption of tough Co matrix around

the WC particles via boron diffusion. Also hardness values of borided inserts went up with increasing boriding temperature and time.

The adhesion capability of the boride layers to substrate were inspected by using Rockwell adhesion test. Firstly, standart load (150 kg) was applied to borided inserts and indentation images were inspected by optical microscope with 100x magnification. Results of this test showed that all borided cutting tools had micro cracks and delaminations. According to the standard failure scale (VDI 3198) HF5 and HF6 type failures were obtained in Rockwell C test. Due to the high hardness and brittleness of boride layer, we also used 60 kg load (Rockwell A) for adhesion test and according to microscopic examinations, cracks and delaminations (HF6 type failure) around the indentation were observed in borided cutting tools under 1000 °C - 8 hrs, 1100 °C - 4 hrs and 1100 °C - 8 hrs parameters. So other borided cutting tools apart from mentioned ones exhibited good adhesion behaviour in Rockwell A adhesion test which is generally used for hard coatings (like diamond) in the literature. Crack and delaminations increased with boriding temperature and time. In the high boriding temperatures, boride layer thickness is higher and due to brittle nature, hertz stress formed microcracks and spallations near the diamond cone indenter during adhesion tests.

After structural and mechanical characterization, the wear performance test of borided cutting tools were conducted on the HNK vertical turning machine placed in machine park of Tusaş Engine Industry and cutting tests were realized on the turning operation of shaft part made from Inconel 718 super alloy. Under the same cutting parameters, flank wear of the borided and original cutting tools were compared to each other. Flank wear values were measured in stereo microscope under 80x magnification. Each borided inserts were tested by using two side of inserts. Average flank wear of these two side in original cutting tool was measured 231 µm. Minimum amount of flank wear was found in borided cutting tool under 800 °C for 8 hrs and measured 120.4 µm. Maximum flank wear was found in borided cutting tool under 1100 °C for 8 hrs and measured 539 µm. Flank wear increase with increasing boriding temperature and time. Because thicker boride layer rises brittleness and causes high amount of abrasive wear. Also borided sample under 1100 °C for 8 hrs parameter, exhibited worst performance, because hardness of this tool is lowest among others. Also borided cutting tools under 1000 °C - 8 hrs, 1100 °C - 4 hrs and 1100 °C - 8 hrs exhibited worse adhesion capability to the substrate, had worse performance than original cutting tool. It is obvious that adhesion and hardness tests had a good agreement with wear test results.

All of these characterization and cutting test results showed that, for WC - Co inserts (6 % Co), optimum boriding parameters should be below:

- Boriding temperatures: 800-900 °C
- Boriding time interval: 2-6 hrs
- Boride layer thickness: < 10 µm

As a result, paste boriding method was applied succesfully on WC-Co cutting tools in this study. So super alloy machining performance of borided cutting tools were improved by % 48. This study has unique property which is investigation of wear performance of borided WC-Co cutting tools on the Inconel 718 super alloy via field tests, so we hope that it will significantly contribute to the literature.

1. GİRİŞ

Talaşlı imalat, günümüzde endüstrinin birçok alanında kullanılan vazgeçilmez bir üretim metodudur. Yüksek yüzey kalitesi, karmaşık geometrilerin işlenebilmesi, işlemede malzeme sınırının az olması, basit olması, geçmişten gelen bir bilgi birikiminin olması, otomasyona uygunluk gibi birçok avantaja sahip olan talaşlı imalat yönteminin; malzeme kaybı, takım aşınması, kesilen yüzeyde oluşturduğu olumsuzluklar (gerilme, yüzey bütünlüğünün bozulması) gibi dezavantajları da mevcuttur. Özellikle son yıllarda gelişen malzeme teknolojileri ile, tasarımlarda mekanik özellikleri yüksek metal alaşımlarının kullanımı giderek artış göstermektedir. Bu doğrultuda talaşlı imalatın en büyük handikapı olan takım sarfiyatı da üreticileri ekonomik olarak sıkıntıya sokmaktadır.

Bu nedenle talaşlı imalat yapan firmalar; öncelikle optimum kesme parametrelerini kullanarak takım aşınmalarını azaltmaya çalışmışlardır. Fakat; kesme parametreleri ne kadar optimize edilirse edilsin kesici takımın malzeme ile teması sonucunda kesme bölgesinde yüksek sıcaklıklara ve aşınmaya maruz kaldığı kaçınılmaz bir gerçektir. Bu nedenle kesici takımlar için daha dayanıklı malzemeler geliştirilmiş ve takımların kaplamalar ile yüzey özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Takım malzemesinin kesme esnasında oluşan yüklere karşı dayanıklı ve aşınma direncinin de yüksek olması için sertliğinin de yüksek olması gerekmektedir. Fakat özellikle frezeleme gibi darbeli kesme kuvvetlerinin olduğu proseslerde takımın tokluğuda önem arz etmektedir. Bu nedenle araştırmacılar kesici takımların tokluğunu fazla düşürmeden yüzey sertliğini artırma yoluna gitmişler ve bunu da yüzeyde koruyucu bir tabaka oluşturarak ya da yüzey sertleştirme tekniklerini kullanarak yapmışlardır. Böylece takım aşınmalarının takımın kırılmasına yol açmadan azaltılabilmesi mümkün hale gelmiştir.

Günümüzde kullanılan en yaygın kesici takımlar yüksek hız çelikleri, sinterlenmiş karbürler ve seramik takımlardır. Özellikle havacılık sektöründe titanyum ve süper alaşım malzemelerin talaşlı imalatında WC-Co sinterlenmiş karbürler ve seramik

takımlar (SiC , Si_3N_4 , sakalcık takviyeli Al_2O_3) sıkça kullanılmaktadır. Özellikle WC-Co sinterlenmiş karbür takımlarda aşınma direncini artırmak amacıyla TiC, TiN ve Al_2O_3 gibi biriktirme (ing. overlay) tipi kaplamalar günümüzde yaygın olarak uygulanmaktadır. Fakat bu kaplamalar kesici takım üzerine mekanik bağlanma vasıtası ile tutunduğundan çalışma esnasında kaplamanın yüzeyden kalkması ihtimali yüksektir ve özellikle kaplamaya olan kimyasal afinitesi yüksek malzemelerin kesiminde (Titanyum gibi) kaplama kesilen malzeme ile birleşerek yüzeyden daha kolay ayrılabilir. Bu nedenle bir diğer yüzey sertleştirme yöntemleri olan karbürleme, borürleme ve nitrürleme teknikleri ile ana malzeme içerisindeki fazlardan yola çıkılarak sert bir tabakanın elde edilmesi, dolayısıyla metalurjik bir bağ oluşturulmasından dolayı söz konusu tabakanın yüzeyden ayrılması daha zor olmaktadır. Örnek olarak Baştürk'ün yaptığı çalışmada, plazma borlanmış WC-Co kesici takımlar ile işlenen Ti alaşımında elde edilen takım performansındaki artış dikkat çekici olmuştur [1].

Baştürk'ün yaptığı çalışmadan farklı olarak, bu tez çalışmasında pasta borlama yöntemi ile borlanmış WC-Co (% 94 WC, % 6 Co) kesici takımların Inconel 718 süper alaşım talaşlı imalat performansları artırılmaya çalışılmıştır. Bunun için önce literatür taranmış fakat WC-Co takımların borlanması ile alakalı çok az çalışma olduğu görülmüştür. Literatürde yer alan borlama çalışmalarının büyük bir kısmı demir esaslı malzemelerle ilgili olduğundan WC-Co borlama ile ilgili sınırlı sayıdaki kaynaklardan faydalanılarak ön borlama deneyleri yapılmıştır. Bu deney sonuçlarından yola çıkarak optimum olabilecek sıcaklık ve süre aralığı belirlenmiş, tez çalışmasında belirlenen bu şartlar altında borlama işlemleri yapılmıştır.

Borlama sonucunda borür tabakasının kalınlığı SEM analizi ile, borür fazlarının saptanması XRD analizi ile, yüzeydeki sertlik artışı Vickers sertlik testi ile, kaplama yapışma kabiliyeti ise Rockwell adhezyon testi ile belirlenmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak ilk defa süper alaşım malzeme üzerinde borlanmış takımların kesme testleri gerçekleştirilmiş ve borlanmamış takım ile kıyaslaması yapılmıştır. Aşınma kriteri olarak seçilen serbest yüzey aşınması miktarı stereo mikroskopta ölçülmüş ve takımlar karşılaştırılmıştır. Buna göre borlanmış takımlarda borlanmamış takıma göre % 48 civarında takım aşınmasında azalma oluşturulabildiği görülmüştür.

Çalışma sonucunda, aşınma ve yapısal-mekanik karakterizasyon sonuçları değerlendirilmiş, takım aşınmasını azaltan optimum borlama parametre aralığı belirlenmiştir.

Tez çalışması devam eden bölümlerde beş farklı bölüme ayrılmıştır. İkinci bölümde talaşlı imalatta kullanılan kesici takımlar, WC-Co sinterlenmiş karbürler ve süper alaşım talaşlı imalatı ile ilgili bilgiler verilecektir. Üçüncü bölümde kesici takımlara uygulanan yüzey işlemleri ve özellikle borlama ile ilgili yapılan çalışmalar özetlenecektir. Dördüncü bölümde deneysel çalışmalar ile yapısal-mekanik karakterizasyonlar ve aşınma testlerinin nasıl yapıldığı anlatılacaktır. Beşinci bölümde ise dördüncü bölümdeki karakterizasyon ve saha testlerinin sonuçları verilecektir. Altıncı ve son bölümde ise genel sonuçlar verilerek yapılan çalışmanın değerlendirmesi yapılacaktır.

2. KESİCİ TAKIMLAR, TAKIM AŞINMASI VE SÜPER ALAŞIMLARIN TALAŞLI İMALATI

2.1 Kesici Takım Malzemeleri

Talaşlı imalatla kesici takımların gösterdiği performans üretilen parçanın kalitesinin yanı sıra verimlilik ve ekonomik kazancı da önemli oranda etkilemektedir. Kesici takımların talaş kaldırma esnasında oluşan yüksek ısı, kuvvet ve darbe gibi etkilere karşı dayanabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle takım malzemesinin kesilen malzemeye göre yüksek sertlik, eğilme ve basma mukavemeti, iyi bir tokluk, yüksek sıcaklıklara dayanım, aşınma direnci, ucuz ve kolay işlenebilme gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir. Fakat bu özelliklerin tamamını bünyesinde barındıran bir takım malzemesi henüz yoktur. Bu nedenle işlenecek malzeme ve kullanılan tezgahın yanı sıra takım maliyetleride göz önünde bulundurularak uygun bir kesici takım malzemesi seçilmesi, talaşlı imalatın verimliliğini ve ekonomikliğini artıracaktır. [2]

Kesici takım malzemesi olarak 1800’lü yıllarda yüksek karbonlu çelikler sıklıkla kullanılmıştır. Fakat bu takımların çok çabuk aşınması ve işleme sürelerinin uzun olması nedeniyle, çeliğe Co, Cr gibi elementlerin ilavesi ile yüksek hız çeliği olarak bilinen takım malzemeleri kullanılmaya başlanmıştır. 20. Yüzyıl başlarında WC’nin sentezlenmesi ve Co ile sinterlenebilmesi, sement karbür kesici takımların gelişmesini sağlamıştır. Seramikler ise, gelişen sinterleme teknolojisine bağlı olarak daha tok halde üretilebilmiş ve giderek talaşlı imalat sektöründe yaygın hale gelmiştir. 1980’li yıllara gelindiğinde ise talaşlı imalatla kaplamalı sement karbür takımlar kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde kullanımı çok yaygın olmamakla birlikte kübik bor nitrür ve polikristalin elmas gibi pahalı ve çok sert kesici takımlarda kullanılabilmektedir. [3]

Genel olarak kesici takımlar için; kimyasal bileşim, malzeme cinsi, mekanik özellik ve sertliğe göre çeşitli sınıflandırma yöntemleri mevcuttur. Fakat burada fazla ayrıntıya girilmeden malzeme cinsine göre talaşlı imalatla kullanılan kesici takımlarla ilgili kısa bilgiler verilecektir.

2.1.1 Takım elikleri

Takım elikleri talaşlı imalatın ilk uygulamalarından günümüze kadar kullanılagelmiş en ucuz takım malzemeleridir. Takım eliklerinde sertlik; karbon oranının yükseltilmesi ya da Co, Cr, Mo, Nb, V, W gibi sert karbür yapıcı elementlerin ilavesi ile sağlanmaktadır. [2,3]

Alaşımsız karbon çeliklerinde sertleştirme işlemi malzemenin ısıtılması ve hızlı bir şekilde soğutulması ile yapılmaktadır. Soğutma işlemi suda, havada ya da yağda yapılabilmektedir. Fakat karbonlu takım çelikleri yüksek sıcaklıkta sertliklerini kaybetmektedir. Karbon oranı % 0.6 ile 1.4 arası değişen karbon çelikleri ortalama 60 HRC sertliğe sahiptir ve genellikle düşük sıcaklıklarda kullanılabilmektedir. [3]

Az alaşımlı takım çelikleri ise az miktarda Cr, V, W, Mo ve Mn içerirler. Bu elikler yağda veya havada sertleştirilebilmektedir. Piyasada sıkça duyulan yağ çeliği ve hava çeliği bu grup takım malzemelerinin karbon çeliklerine göre bir üstünlükleri yoktur ve maksimum 300  C sıcaklığa kadar kullanılabilmektedir. [3]

Yüksek hız elikleri (HSS) ise W ve Cr oğunluklu olmak üzere Mo, Nb, V, Co gibi elementleri içermekte olup AISI ve SAE standartları gereği çeşitli kısaltmalar ile isimlendirilmektedir. 600  C sıcaklığa kadar kullanılabilen HSS takımların sertliği ortalama 63 HRC civarındadır. [2,3]

2.1.2 Seramikler

Seramik malzemeler atomik bağ yapısı gereği oldukça sert ve oksidasyona dirençli malzemelerdir. Genellikle sinterleme metodu ile üretilen seramiklerde takım malzemesi olarak Al_2O_3 en çok kullanılan seramiktir. Al_2O_3 ' n kimyasal kararlılı yüksektir ve genellikle elik malzemelerin final işlemelerinde kullanılmaktadır. Seramik takımların tokluğunu iyileştirmek için Si_3Ni_4 sakalcık ilavesi de yapılabilmektedir. Çalışma sıcaklığı 1800  C'ye kadar çıkabilen seramik takım malzemelerinin sertliği 93 HRA civarındadır. [2,3]

2.1.3 Sermetler

Temel olarak sermetler (seramik + metal) seramiğin metal ile bağlanması suretiyle elde edilen takım malzemeleridir. Sinterlenmiş karb rl r (WC-Co) ve sermetler aynı

malzeme grubunda yer almasına rağmen; sermetlerin mikroyapıları sinterlenmiş karbürlerden farklıdır. Çünkü sermetlerde sert seramik fazının metal içerisindeki çözünürlüğü sinterlenmiş karbürlere göre daha fazladır. Sermetler sinterlenmiş karbürlere göre daha gevrek bir yapıya sahip olup bünyesinde barındırdığı metal bağlayıcı miktarı % 20'nin altındadır ve genellikle çelik ve dökme demirlerin yüksek hızda işlenmesinde kullanılmaktadır. [4]

Al_2O_3 ve TiC gibi seramiklerin Mo, Cr, Fe, Ni gibi metaller ile bağlanması suretiyle sermetler elde edilebilmektedir. Sermetlerin seramiklere göre en önemli özelliği iyi bir darbe ve eğme mukavemetine sahip olmalarıdır. [3, 4]

2.1.4 Kübik bor nitrür (CBN)

CBN elmasdan sonra ikinci en sert malzemedir. Bu malzeme az miktarda bağlayıcı ve % 100 CBN'in yüksek basınç ve sıcaklık altında kristal kafesinin hegzagonal yapıdan kübik yapıya dönüştürülmesi yoluyla elde edilmektedir. CBN takımların elmas takımlara göre en önemli avantajı yüksek sıcaklıklarda çeliğe kaşı gösterdiği kimyasal kararlılıktır. Son yıllarda CBN takımlar sertleştirilmiş dökme demir ve çeliğin yanı sıra, nikel ve kobalt esaslı süper alaşımların da işlenmesinde kullanıldığı görülmektedir. [4]

2.1.5 Polikristalin elmas

Elmas şüphesiz doğadaki en sert malzemedir. Sıcaklığa ve aşınmaya karşı oldukça dayanıklı olan elmas, kırılgan ve pahalıdır. Elmas takımlar tokluğunun düşük olması nedeni ile genellikle final işlemlerde, düşük pasolu talaş kaldırılan operasyonlarda kullanılmaktadır. Fakat elmas yüksek sıcaklıklarda grafit'e dönüşerek demir ile reaksiyona girdiğinden dolayı genellikle demir dışı malzemelerin (Al ve Cu alaşımları, sinterlenmiş karbürler gibi) talaşlı imalatında kullanılabilmektedir. [2, 3, 4]

Polikristalin elmas ise çok yüksek basınç ve sıcaklık altında kristalize elmas taneciklerinin yapay olarak sentezlenmesi ile üretilmektedir. Üretilen bu katı veya toz yapay elmaslar, sert altlık üzerine kesme vazifesini yapacak kısma lehimlenmek veya sinterlemek suretiyle monte edilerek kullanılmaktadırlar. [3]

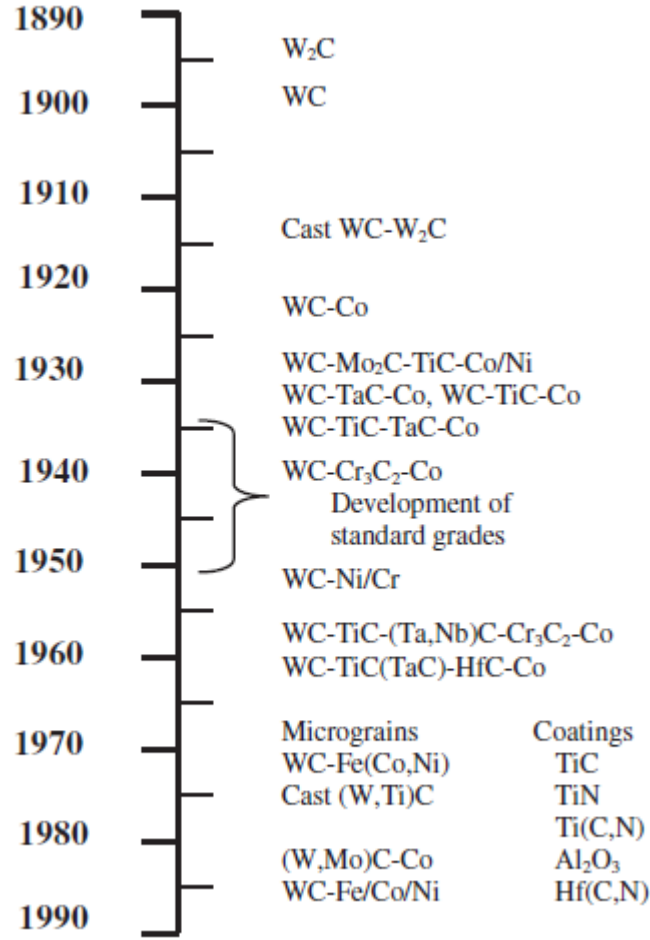
2.1.6 Sinterlenmiş karbürler

Sinterlenmiş karbürler; sert metal ya da sement karbür olarak da adlandırılmakta olup; TiC, TaC ve çoğunlukla WC'ün Fe, Ni ve Co gibi metal bağlayıcılar ile sinterlenmesi yoluyla üretilen kesici takım malzemeleridir. TiC, TaC ve WC karbürler toz olarak üretildikten sonra yaklaşık 5000 atm basınç altında preslenerek ön şekil verililerek 900 °C'de ön sinterlemeye tabii tutulur. Ön sinterlenmiş bu takımlar taşlanarak nihai şekli verilir ve 1400 - 1600 °C sıcaklıkta final sinterleme operasyonuna tabii tutulurlar. Bu şekilde üretilen sinterlenmiş karbürler çok sert olup yüksek sıcaklık aşınma direncine sahip takım malzemeleridir. [2]

2.1.6.1 WC-Co

Tungsten (W), doğada genellikle wolframit ((Fe,Mn)WO₄) ve şelit (CaWO₄) minerali halinde bulunmakta ve en büyük W rezervi Çin'de bulunmaktadır. İlk sinterlenmiş WC 1914 yılında tel çekme kalıpları ve kaya delicilerinin yapımında kullanılmıştır. O yıllarda döküm yoluyla üretim denemeleri yapılan WC'ün üretimindeki dönüm noktası; bağlayıcı metal ile birlikte sinterlenebilmesinin mümkün hale gelmesiyle başlamıştır. Çünkü WC'ün çok sert bir malzeme olması nedeni ile direkt olarak sinterlenmesi mümkün olamamaktadır. Bu nedenle Co bağlayıcı ilavesi ile daha düşük sıcaklıkta sinterlemesi gerçekleştirilebilen WC-Co takımlar 1925'den bu yana gelişerek özellikle kesici takım endüstrisinde önemli bir yer tutmaya başlamıştır. 1930'lardan 1970'e kadar TiC, TaC ve Cr₃C₂ gibi bazı karbürlerinde ilavesi ile WC-Co gelişimi sürdürülmüştür. 1970'li yıllarda ise kaplama teknolojileri ile WC-Co kesici takımların performansları daha da iyileştirilerek günümüzdeki kullanım alanı oldukça genişletilmiştir. WC-Co malzemesinin yıllara göre tarihi gelişimi Şekil 2.1'de verilmiştir. [5]

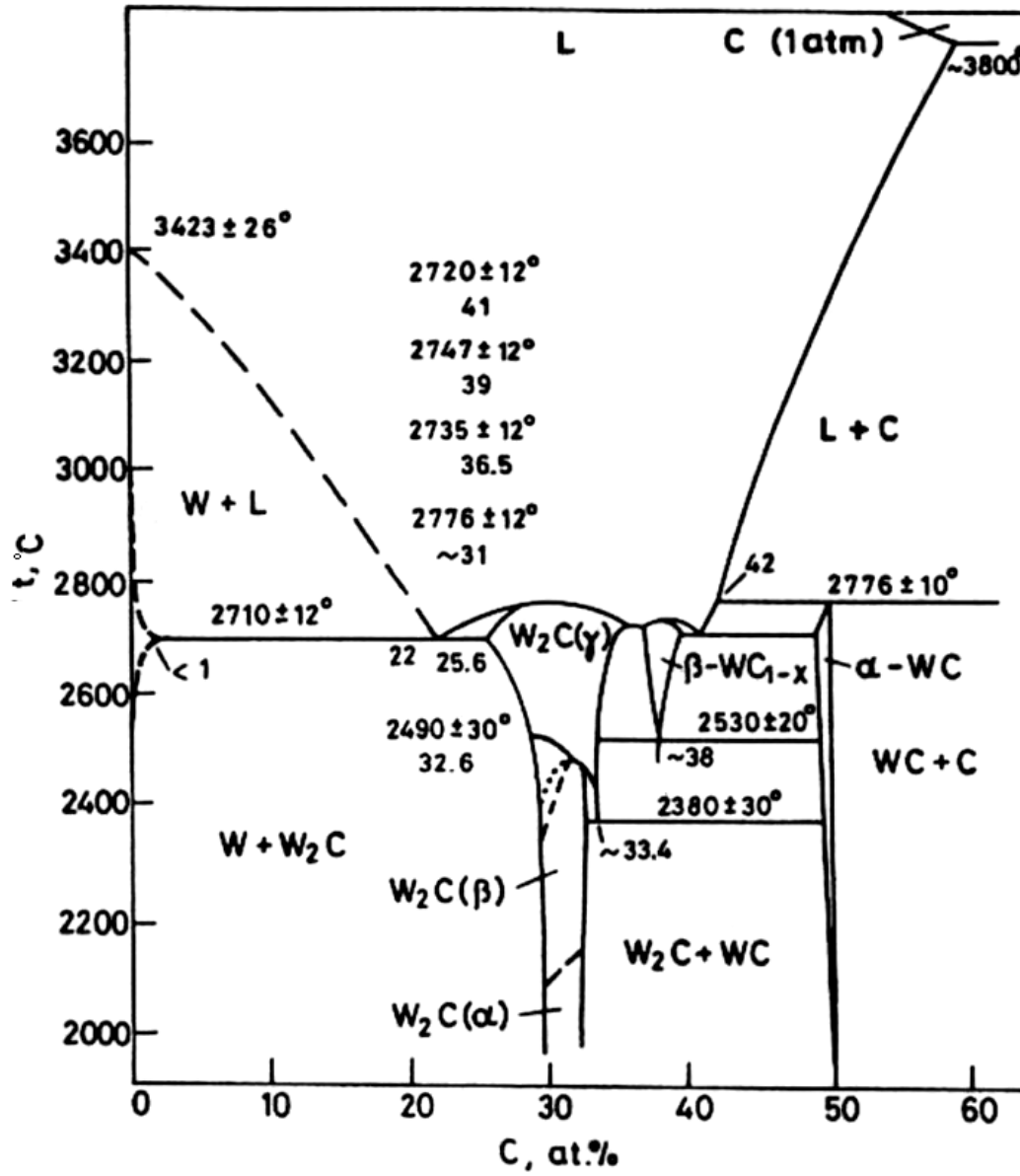
WC; şelit ve wolframit minerallerinin zenginleştirilmesi ile elde edilen amonyum para tungstatın (ing. amonium paratungstate) kalsinasyon ile tungsten oksit haline dönüştürülmesi ve bu oksitin redüklenmesi (karbürizasyonu) yoluyla üretilmektedir. W-C sisteminde iki farklı stokiometri söz konusudur. Bunlar WC ve W₂C'dir. Her iki bileşikte farklı sıcaklık ve kompozisyonlarda kararlı olan polimorfik türeve sahiptir. Fakat literatürde tutarlı ve net bir bilgi henüz bulunmamaktadır.



Şekil 2.1 : WC kesici takımın tarihi gelişimi [5].

WC fazı δ -WC fazı olarakda bilinmekte olup hegzagonal kristal yapıya sahiptir. Bunun dışındaki diğer iki fazdan biri C atomlarının oktahedral boşlukları doldurduğu hegzagonal alt kafese sahip $WC_{0.5}$ fazı (normal olarak β - W_2C olarak bilinmektedir) ve diğeri ise yüksek sıcaklıkta çok dar bir aralıkta C atomları tarafından arayer boşlukları doldurulan yüzey merkezli kübik alt kafese sahip kübik NaCl yapısına benzeyen γ - WC_{1-x} (x yaklaşık 0.4) fazıdır. W-C faz diyagramı Şekil 2.2’de verilmiştir. [5, 6, 7]

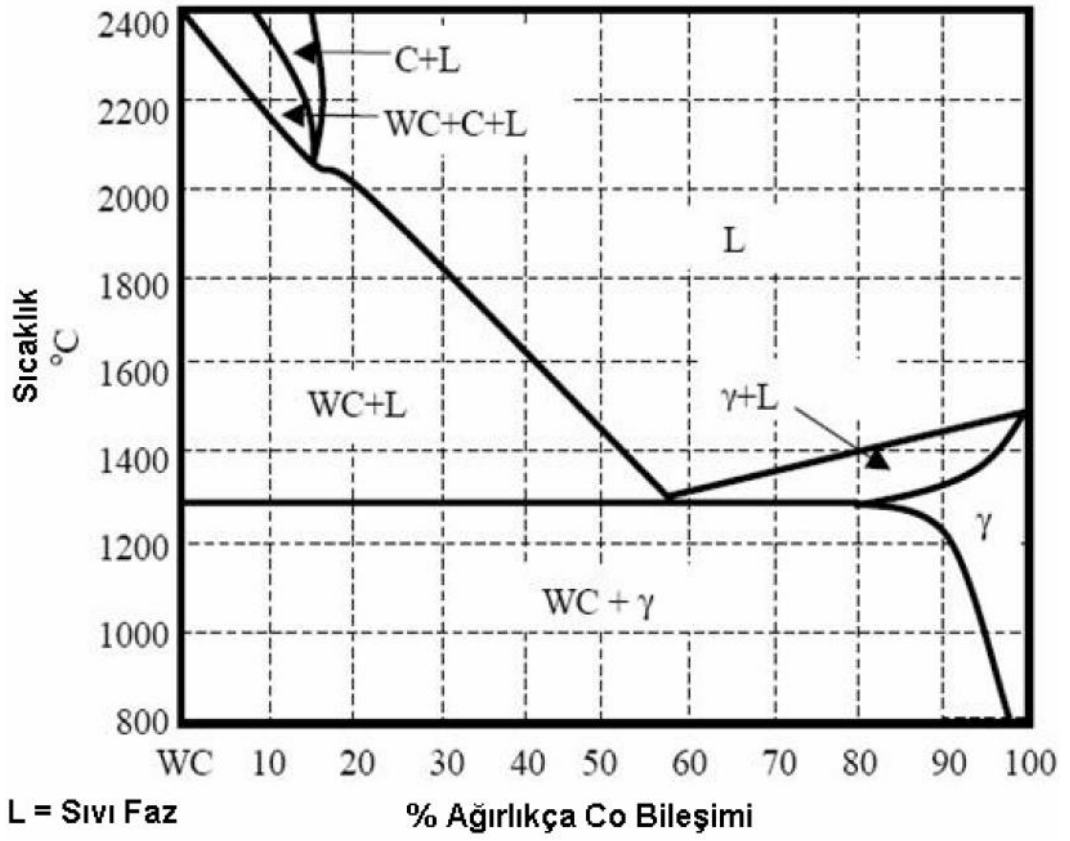
WC-Co ikili sisteminde Co, WC karbür tanelerini bir ağ gibi sararak bir arada tutar ve poroziteyi düşürerek WC’ün dayanımını iyileştirir, tokluğu artırır. Bağlayıcı faz sürekli bir yapıya sahiptir. WC-Co ikilisine ait faz diyagramı Şekil 2.3’de verilmiştir. WC-Co ikilisinin faz diyagramı incelendiğinde WC’ün Co içerisindeki çözünürlüğü oda sıcaklığında oldukça düşüktür (< %1). Fakat 1000 °C’de % 0.5’e kadar C ve % 2’den biraz az WC, Co içerisinde çözülebilir.



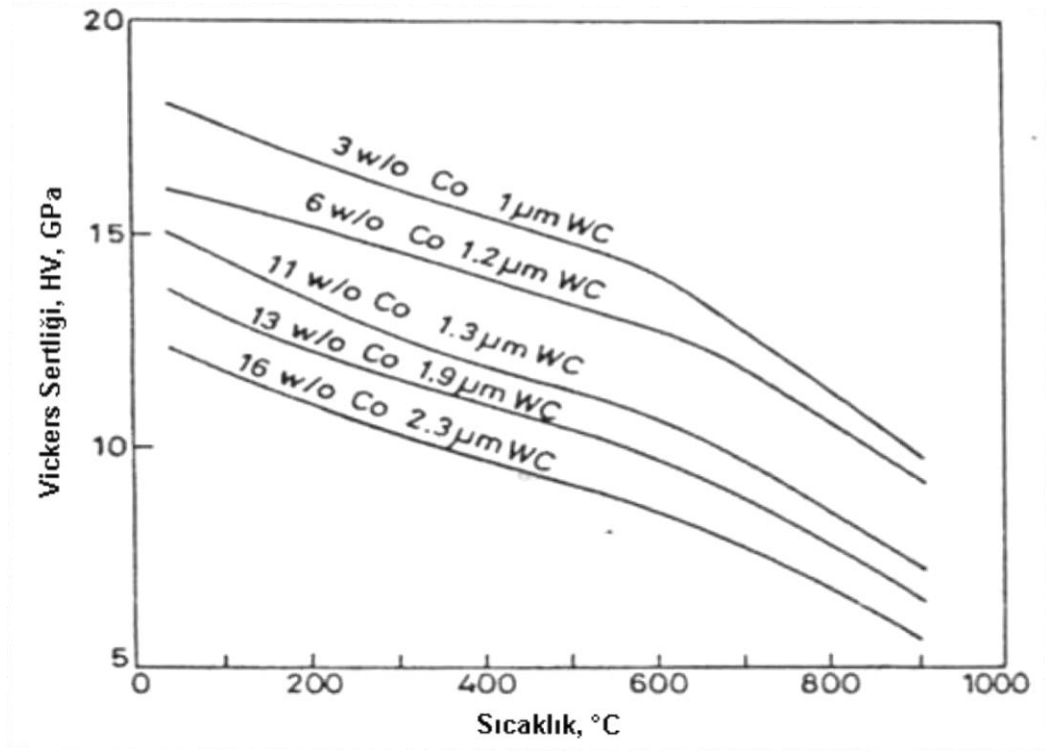
Şekil 2.2 : W-C ikilisine ait faz diyagramı [7].

Faz diyagramında artan Co miktarına bağlı olarak sistemin sıvı faza geçtiği sıcaklıkta bir düşme meydana gelmekte ve 1320 °C sıcaklıkta bir ötektik noktanın bulunduğu görülmektedir. Bu ötektik oluşum sıvı faz sinterleme operasyonu için oldukça önemlidir. [7, 8]

WC-Co kesici takımların performansı Co bağlayıcı içeriğine, karbür bileşimine ve karbür tane boyutuna bağlı olup mekanik ve fiziksel özelliklere de önemli ölçüde etki etmektedir. Şekil 2.4'de farklı Co bileşimi ve WC tane boyutundaki sinterlenmiş karbürün sıcaklığa bağlı olarak sertlik değişimi verilmiştir. [7]



Şekil 2.3 : WC-Co ikili sistemine ait faz diyagramı [7].



Şekil 2.4 : WC-Co sinterlenmiş karbürün farklı Co içeriği ve WC tane boyutu için sıcaklığa bağlı sertlik değişimi [7].

Genel olarak Co bağlayıcı miktarının artması kesici takımın tokluğunu artırmakta fakat sertliğini de düşürmektedir. Aynı şekilde iri taneli WC kesici takım, ince taneliye göre daha sert bir karaktere sahiptir. Ayrıca iri taneli WC-Co takımların basma mukavemetleri ince tanelilere göre daha küçüktür. [8]

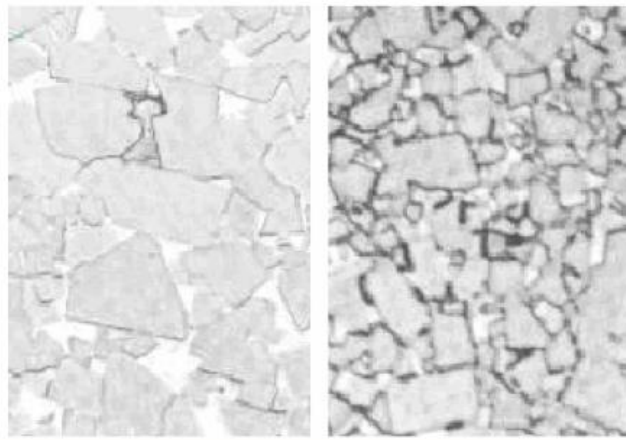
WC-Co kesici takımlar için sertlik değerleri literatürde genellikle Vickers ve Rockwell A biriminde verilmektedir. Rockwell A genellikle hacimsel olarak daha iyi bir sertlik bilgisi vermektedir. WC fazının diğer karbür bileşiklerine göre sertlik değerleri ve ergime sıcaklıkları Çizelge 2.1’de verilmiştir. [8]

Çizelge 2.1 : Bazı karbürlerin ergime sıcaklığı ve sertlikleri [8].

Karbür Çeşitleri	Ergime derecesi (°C)	Sertlik (HV ₃₀)
TiC	3200	3200
V ₄ C ₃	2800	2500
NbC	3500	2400
TaC	3900	1800
WC	2850	2100

WC-Co kesici takımların sertliğinin takım çeliklerine göre yüksek olması abrasif aşınma direnci de sağlamaktadır. Ayrıca bu malzemelerde bir diğer önemli mekanik özellik tokluğun bir göstergesi olan eğme mukavemeti olup, WC-Co takımlarda Co bağlayıcı miktarının artmasıyla tokluk artmaktadır. [7]

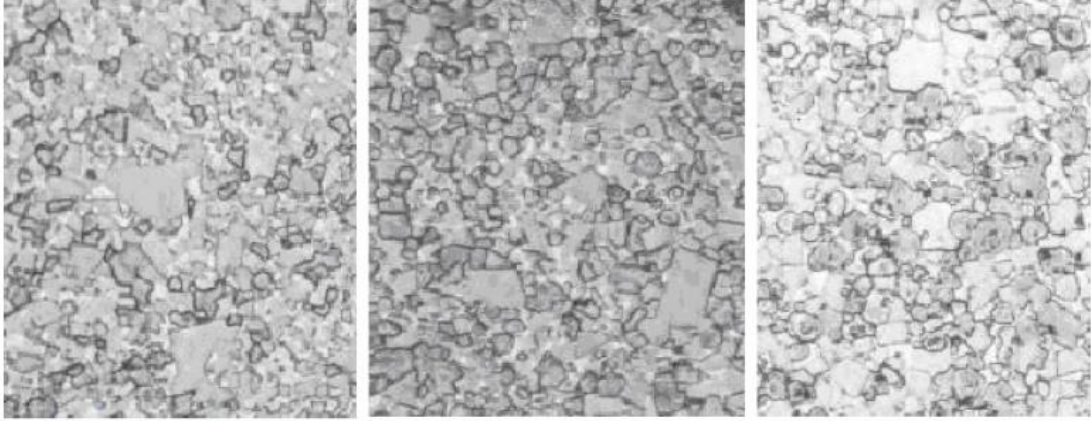
Şekil 2.5’de % 94 WC - % 6 Co içeren orta ve iri taneli WC-Co kesici takım mikroyapıları görülmektedir. Burada koyu köşeli yapıdaki taneler WC fazını, beyaz ve WC tanelerin arasına dağılmış taneler ise Co fazını temsil etmektedir.



Şekil 2.5 : % 94 WC - % 6 Co içeren orta ve iri taneli WC-Co mikroyapısı (1500x) [8].

2.1.6.2 WC-Co-(TiC, TaC, NbC)

Sadece WC-Co ikilisinden oluşan kesici takıma TiC, TaC ve NbC gibi karbürlerin ilavesi ile takımların sertlik, yüksek sıcaklık mukavemeti ve oksidasyon direnci artırılabilir. Bu katkı karbürleri WC-Co takımlara ayrıca ısıyı daha az iletme ve işlenen takıma daha az yapışma özelliği katmaktadır. Şekil 2.6’da farklı bileşimlerde TiC, TaC ve NbC içeren WC-Co kesici takım mikroyapıları görülmektedir. [8]



Şekil 2.6 : % 85 WC - % 9 (Ta,Ti, Nb) C - % 6 Co, orta taneli yapı (başta), % 78 WC - % 15 (Ta,Ti, Nb) C - % 7 Co orta taneli yapı (ortada), % 73 WC - % 19 (Ta,T, Nb) C - % 8 Co orta taneli yapı (sonda) [8].

TiC yerine TaC ilavesi WC-Co kesici takımların daha sünek ve kenar dayanımının yüksek olmasını sağlar. Fakat TaC ilaveli takımların yüksek kesme kuvvetlerine karşı mukavemeti düşük olduğundan genellikle TaC ve TiC birlikte katkı karbürü olarak WC-Co kesici takımlarda yer alırlar [8].

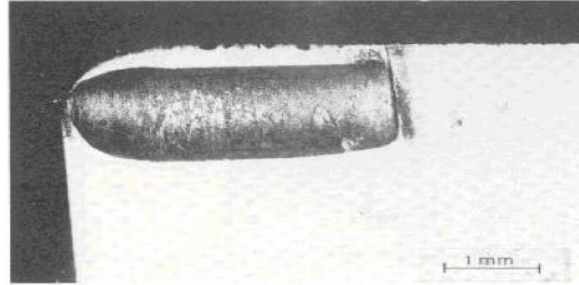
2.2 Kesici Takımlarda Meydana Gelen Aşınmalar

Talaşlı imalatta kullanılan kesici takımlar, kesilen malzeme ile sürekli temas halinde olduğundan oluşan ısı ve kesme kuvvetleri aşınmaya neden olmaktadır. Talaşlı imalatındaki temel aşınma mekanizmaları; abrazyon aşınması, difüzyon aşınması, oksidasyon aşınması ve yorulma aşınması olarak karşımıza çıkmaktadır. Abrazyon aşınmasında kesilen parçadaki sert partiküller takım üzerinden malzemeyi kazımak suretiyle aşınmaya neden olur. Difüzyon aşınmasında ise kesici takım ile kesilen malzemenin birbirine olan afinitesi nedeniyle kimyasal reaksiyonlar meydana gelmekte ve yapışma/kopma şeklinde takım üzerinde malzeme kaybı oluşmaktadır. Oksidasyon aşınmasında ise kesilen talaşın yüksek sıcaklıkta oksidasyonu takım

üzerine temas ettiği bölgelerde aşınmalara sebep olur. Yorulma aşınmasında takım hem mekanik hem de termal bir çevrime maruz kaldığından yorularak kırılma ve parçacık kopmaları meydana gelebilmektedir. [3]

Yukarıdaki temel aşınma mekanizmaları sebebiyle sinterlenmiş karbür takımlarda meydana gelen temel takım aşınması tipleri ise serbest yüzey aşınması, krater aşınması, yapışma ve talaş sıvanması aşınması (BUE), plastik deformasyon, difüzyon aşınması, termal yorulma ve talaş derinliğinde çentik olarak sıralanabilmektedir.[8] Bu tez çalışmasında serbest yüzey aşınmasının önemli olması ve kriter olarak alınmasından dolayı bu aşınma türü diğerlerinden ayrı olarak ele alınacaktır.

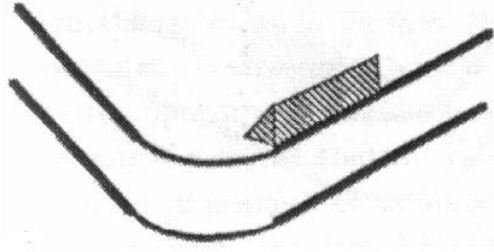
Krater aşınması difüzyon aşınması ile başlayıp abrazyon aşınması ile devam eder. Takım üzerinde sıcaklığın en yüksek olduğu bölgede talaşın akması esnasında kimyasal bir etkileşim meydana gelir. Bu etkileşimin devamında abrasif etki ile söz konusu bölge krater şeklinde aşınmaktadır. Krater aşınmasını azaltmak için kimyasal afinitesi az olan kesici takım kullanılmalı, kesme ve ilerleme hızları düşürülmeli, kaplama ve uygun bir kesme sıvısı kullanılması gerekmektedir. Şekil 2.7’de % 0.4 C içeren bir çeliğin işlenmesi sırasında WC-Co takımda meydana gelen krater aşınması ve sıcaklık dağılımının görüntüsü verilmiştir. [3, 8]



Şekil 2.7 : % 0.4 C içeren bir çeliğin WC-Co ile işlenmesi sırasında ortaya çıkan krater aşınması [8].

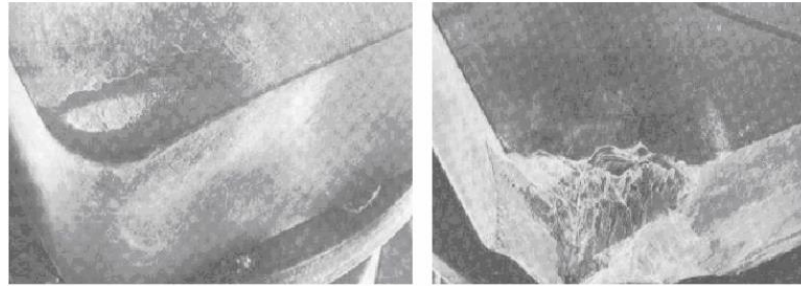
Yapışma ve talaş sıvanması aşınması (BUE), kesim hızının yavaş olduğu, sıcaklığın yeterince yüksek olmadığı ve yeterli deformasyonun meydana gelmediği durumlarda kesilen malzemenin takım üzerine sıvanması ve bir süre sonra bu yığılan malzemenin pekleşerek sertleşmesi ile meydana gelmektedir. Bu yığıntı daha sonra ısınarak takım üzerinden ayrılır ve darbeli bir kesim gerçekleşmesine neden olur. Ayrıca yığıntı takım üzerinden ayrılırken küçük parçacıklar da koparak beraberinde götürür. Genellikle Al gibi yumuşak malzemelerin işlenmesinde ortaya çıkan talaş sıvanması; yüzey pürüzlülüğü az olan takım kullanmak ve yüksek hızlarda kesim yapmak

suretiyle giderilebilmektedir. WC-Co kesici takımlar ile dökme demir ve çelik işlenmesi esnasında genellikle yapışma aşınması görülebilmektedir. Şekil 2.9'da talaş sıvanması aşınmasının temsili görüntüsü verilmiştir. [8, 9]



Şekil 2.8 : Kesici takım üzerinde talaş sıvanması aşınması (BUE) [9].

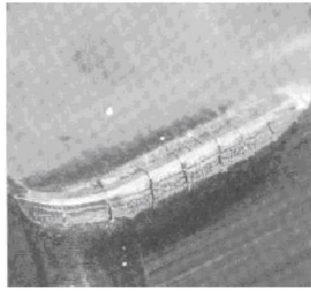
Plastik deformasyon ile aşınma ise yüksek kesme ve ilerleme hızı nedeniyle oluşan yüksek basma kuvvetleri ile takımın deforme olmasına ve parçacık kopmasına dayanır. Yüksek sertlik nedeni ile karbür kesici takımlar genellikle kırılarak deformasyona uğramaktadır. Karbür kesici takımlar dahi yüksek sıcaklıklarda çatlama ve kırılmaya uğramaları nedeniyle ancak sınırlı bir deformasyon direnci göstermektedir. Keskin köşeli veya çok küçük burun çaplı takımlarda genellikle bu tip bir deformasyon meydana gelmektedir. Şekil 2.9'da yüksek hız ve ilerlemede karbür kesici takımda meydana gelen çukurlaşma ve deformasyon görülmektedir. [3, 8]



Şekil 2.9: Yüksek hız ve ilerlemede karbür kesici takımda meydana gelen çukurlaşma (solda), deformasyon (solda) [8].

Difüzyon aşınması, çeliklerin yüksek hız ve ilerleme altında işlenmesi esnasında sıcaklık nedeniyle kesici takımın talaş akma yüzeyinde kraterleşme meydana gelir. Krater aşınması öncesindeki aşınma mekanizması difüzyon aşınmasıdır ve WC-Co kesici takımlarda 800-850 °C sıcaklıkta difüzyon aktif hale gelerek demir içerisinde WC çözünebilmekte ve difüzyonla aşınma mekanizması bu şekilde meydana gelmektedir. Özellikle aşırı serbest yüzey aşınması gösteren WC-Co takımlarda şüphelenilmesi gereken aşınma türü difüzyon aşınmasıdır. Co içeriğine ve kesilen malzemenin cinsine bağlı olarak difüzyon aşınması değişebilmektedir. [8]

Kesici takımlardaki bir diğer aşınma türü termal yorulma çatlaklarıdır. Kesintili kesme, soğutma sıvısının sürekli akması ve takımın rijit olarak bağlanması nedeniyle kesme kenarına dik yönde oluşan çatlaklar termal; kesme kenarına paralel yönde olan çatlaklar ise mekanik çatlaklar olarak nitelendirilmektedir. Termal çatlaklar genellikle kesimin bittiği esnada takımda meydana gelen soğuma ile termal genişleme ve daralmalar sonucu meydana gelmektedir. Hatta bu çatlaklar zamanla birleşerek takımın kesme kenarından parçacık kopmaları meydana gelebilmektedir. WC-Co kesici takımlarda TaC ilavesi ile termal yorulma direnci artırabilmektedir. Şekil 2.10’da karbür kesici takımda meydana gelen termal çatlaklar görülmektedir. [8]



Şekil 2.10: Nikel esaslı bir alaşımın düşük hızda işlenmesi sırasında kesme kenarında meydana gelen termal çatlaklar (15x büyütmede) [8].

Çentik aşınması ise kaba işleme esnasında takım ile işlenmemiş yüzey/talaş kenarı arasındaki temas noktasında, takım yüzeyinde çentik şeklinde kendini göstermektedir. Şekil 2.12’de nikel esaslı bir süper alaşımın işlenmesi sırasında ortaya çıkan çentik aşınması verilmiştir. [9]

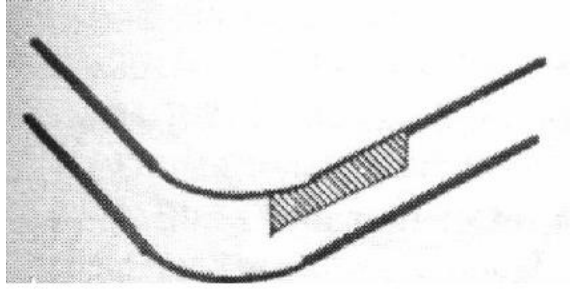


Şekil 2.11 : Nikel esaslı süper alaşımların karbür takımla işlenmesi esnasında meydana gelen çentik aşınması [8].

Çentik aşınması genellikle paslanmaz çelikler ile süper alaşımların işlenmesinde karşılaşılan bir problemdir. Bu tip malzemelerin kesimi esnasında talaş oksitlenerek aşındırıcı bir hal alır ve takım kenarını abrazyon vasıtası ile aşındırır. Takım malzemesinin tokluğunu artırarak, yuvarlak kesici takımlar için uç açısını artırarak ve değişken talaş derinliğinde kesim yapılarak çentik aşınması önlenmektedir. [8]

2.3 Serbest Yüzey Aşınması

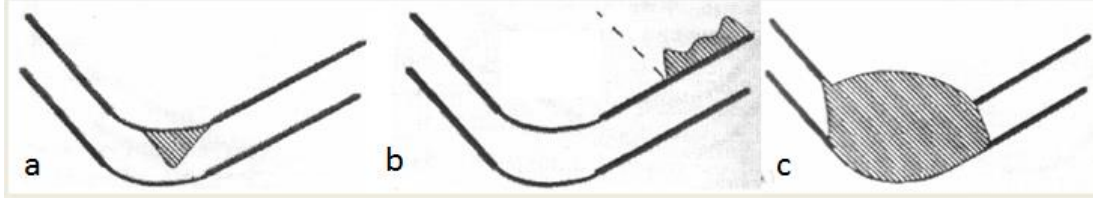
Serbest yüzey aşınması takım ömrünü belirleyen önemli aşınma tipi olup abrazyon aşınma mekanizması nedeniyle meydana gelmektedir. Takım ömrü bu aşınmaya göre belirlenmektedir. Serbest yüzey aşınmasının takım ile iş parçasının sürekli temas halinde olması nedeniyle sıfırlanması mümkün değildir ve genellikle kesme kenarının kütleşmesine neden olur. Azaltılması için takım tasarım açıları değiştirilebilir, takım kaplanabilir veya yağlama özelliği iyi olan bir kesme sıvısı kullanılabilir. Kesici takımın sertliği arttıkça serbest yüzey aşınmasında azalmaktadır. İşlenen malzeme içerisinde sert karbür, döküm kumu veya alümina gibi partiküllerin bulunması abrazyon aşınmasını tetikler. WC-Co sinterlenmiş karbürlerin takım çeliklerine göre serbest yüzey aşınma direnci daha yüksektir. İyi bir aşınma direnci için ince yapılı ve az miktarda Co içeren WC-Co kesici takımların kullanılması tavsiye edilmektedir. Şekil 2.12’de temsili bir serbest yüzey aşınması gösterilmiştir. [8, 9]



Şekil 2.12 : Kesici takımda meydana gelen abrazyon kaynaklı serbest yüzey aşınması [9].

2.4 Diğer Aşınma Türleri

Kesici takımlarda yukarıda bahsedilenlerden farklı olarak burun aşınması, talaş vurması ve takım kırılması gibi aşınma türlerine de rastlanmaktadır. Burun aşınması kesici takımın burun bölgesinde serbest yüzey aşınması ve çentik aşınmasının birleşiminden oluşan abrazyon ve korozyon/oksidasyon nedeniyle tetiklenen bir aşınma türüdür. Talaş vurması ise paslanmaz çelik gibi tok ve aşındırıcı talaş veren malzemelerin seramik takımlar ile işlenmesinde, talaşın geriye doğru kıvrılması ve takım üzerindeki bir bölgeye çarpması suretiyle meydana gelir. Takım kırılması takımın kesme kenarında meydana gelen ve parçacık kopmasıyla oluşan bir aşınma türüdür. Söz konusu aşınma türleri Şekil 2.13’de gösterilmiştir. [9]



Şekil 2.13 : a) Burun aşınması, b) Talaş vurması, c) Takım kırılması [9].

2.5 Süper Alaşımlar ve Talaşlı İmalatı

Süper alaşımlar çoğunlukta Ni elementini içermekle birlikte Cr, Al gibi en az on farklı elementi de bünyesinde barındıran, ergime noktasına yakın sıcaklıklarda mekanik ve kimyasal bozunmaya dirençli yüksek sıcaklık malzemeleridir [10]. Nikel, kobalt ve demir bazlı olmak üzere üç farklı kategoriye ayrılan süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda sürünme, oksidasyon, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık mukavemeti sağladıklarından dolayı uçak motorlarının türbin rotor/stator, yanma odası ve egzoz nozülü gibi sıcak kısımlarında kullanılan yegane malzemelerdir. Ayrıca uçak, gemi, lokomotif ve enerji santrali gaz türbinlerinde, roketlerdeki tahrik sistemlerinde, petrol ve kimya tesislerinin değişik makina parçalarında da süper alaşımlar kullanılabilmektedir. Süper alaşımlarda mukavemetlenme; matris içine dağılmış ince karbür fazlar, intermetalik çökelti ve katı eriyik mukavemetlenmesi ile sağlanmaktadır. Katı eriyik mukavemetlenmesi Fe, Cr, Mo, W, V, Ti ve Al gibi elementlerin Ni matrisi distorsiyona uğratması ile gerçekleştirilir. C, nikel süper alaşım içerisindeki Mo, Cr, V gibi elementler ile MC, M₆C ve M₂₃C₆ formlarında karbür çökeltisi oluşturmak suretiyle mukavemete katkı sağlar. Çökelme sertleşmesinde ise sertlik artışı östenitik nikel matris (γ fazı) içerisinde oluşturulan Ni₃(Al, Ti) -γ' ve Ni₃Nb - γ'' intermetalik fazları sayesinde olmaktadır. [10, 11]

2.5.1 Demir bazlı süper alaşımlar

Bu tür süper alaşımlar içerdiği Fe miktarı ile diğer türlere göre daha ucuzdur. Genel olarak demir bazlı süper alaşımlar % 25-45 Ni, % 15-60 Fe, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direncini sağlamak için % 15-28 Cr ve katı çözelti mukavemetini sağlamak için % 1-6 Mo içermektedir. Bazı çeşitlerinde Al ve Ti ilavesi ile Ni intermetalik bileşik oluşturmak kaydıyla çökelti sertleşmesi de sağlanabilmektedir. Fe bazlı süper alaşımlarda kullanım sıcaklıkları 650 °C'yi geçmemektedir. A-286, Incolloy 801 ve ASTM A297 ticari kullanımı olan demir esaslı süper alaşımlardandır. [11, 12]

2.5.2 Kobalt bazlı süper alaşımlar

Kobalt ergime sıcaklığı ve yoğunluk gibi birçok özellik açısından nikel benzemektedir. Kobalt bazlı süper alaşımlarda ana matris kobalttan oluşmaktadır ve bileşiminde % 50-60 Co, mukavemet ve yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direncini arttırmak için % 20-30 Cr, tokluk için % 20 ye kadar Ni, katı eriyik mukavemetlenmesi için % 5-10 arasında W ve düşük miktarlarda Mo, % 0,1-1 arasında da C bulunmaktadır. Kobalt bazlı süper alaşımlar nispeten düşük gerilmelerde ve yüksek sıcaklıklarda çalışan statik motor parçalarında kullanılmaktadır. Stellite, Haynes 188, Haynes 25 ve AiResist 13 kobalt esaslı bazı super alaşımlara örnektir. [12, 13]

2.5.3 Nikel bazlı süper alaşımlar

Nikel bazlı süper alaşımlar çok iyi korozyon ve oksidasyon direnci ile yüksek sıcaklıklarda kırılma ve sürünme direnci sunduğundan uçak motoru parçalarının yaklaşık % 50'sinde kullanılmaktadır. [11] Ni bazlı alaşımların bileşimi % 38–76 Ni, % 27'ye kadar Cr ve % 20 oranında Co içermektedir. W, Ta ve Mo gibi refrakter elementler ise mukavemet ve oksidasyon direnci sağladığından bileşimde kontrollü miktarlarda bulunabilmektedir. Si, P, S, O ve N gibi alaşım içerisinde halihazırda bulunan elementlerinin miktarı ise üretim kademelerinde hep kontrol altında tutulmaktadır. [13]

Ni bazlı süper alaşımlar çökelti ve katı eriyik sertleşmesi ile mukavemetlendirilen alaşımlardır. Bu alaşımlarda Co, Cr, Mo, W, Fe gibi elementler östenitik matris fazın (γ) oluşumunu sağlarken, Al, Ti, Nb, Ta, Hf gibi elementler de intermetalik γ' ve γ'' fazını meydana getirirler. γ' fazı mukavemet artışı sağlayan ana faz olup sürünme dayanımını iyileştirmektedir. γ'' fazı ise özellikle düşük sıcaklıklarda iyi bir mukavemet sağlamaktadır. İlave olarak Cr, Mo, W, Nb, Ta, Ti gibi elementler de karbür oluşturarak sertliği artırmaktadır. Karbürlerin süresiz ve ince yapıda olması ile özellikle çözeltiye alma ısıl işlemi esnasında tane irileşmesinin önüne geçilebilmektedir. [11]

Inconel (587, 597, 600, 601, 617, 625, 706, 718, X750, 901), Nimonic (75, 80A, 90, 105, 115, 263, 942, PE 11, PE 16, PK33, C-263), Rene (41,95), Udimet (400, 500, 520, 630, 700, 710, 720), Pyromet 860, Astroloy, M-252, Waspaloy, Cabot 214 ve Haynes 230 ticari olarak kullanılan nikel bazlı super alaşımlardır. Bu alaşımlar

içerisinde en çok kullanılan Inconel 718'dir. Nikel bazlı süper alaşımlar günümüzde 1000 °C sıcaklığa kadar uçak motorlarının sıcak bölge statik ve dönen parçalarında kullanılabilmektedir. [14]

2.6 Nikel Bazlı Süper Alaşımların İşlenebilirlik Problemleri

Temel olarak işlenebilirlik; kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği gibi parametreleri içeren bir talaşlı imalat operasyonunda malzemeyi işlemedeki zorluk ya da kolaylık olarak tanımlanmaktadır [14]. Genel olarak paslanmaz çeliklerle benzer özelliklere sahip nikel bazlı süper alaşımların işlenmesi diğer mühendislik malzemelerine göre çok daha zordur.

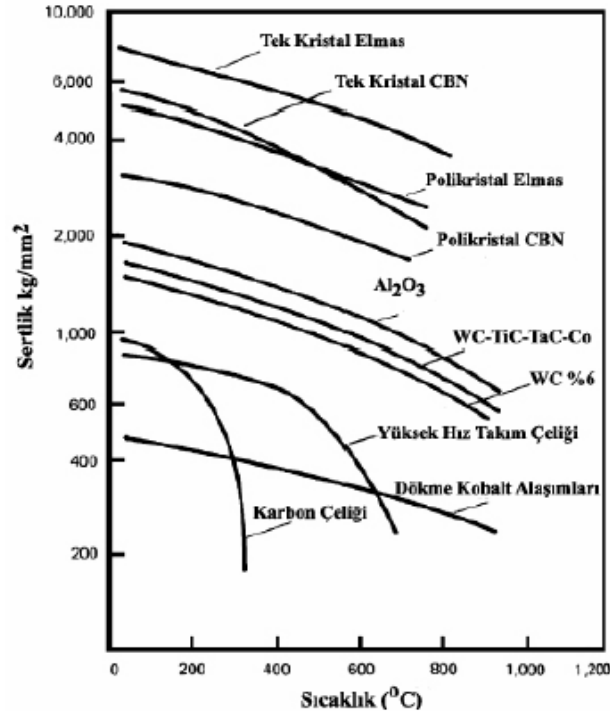
Bir malzemeye dayanımının artırılabilmesi için yapılanlarının tam tersi işlenebilirliği artırmaktadır. Genel olarak bir malzemenin işlenebilirliğinin iyi olması için; dayanımı, yüksek sıcaklık sertliği, pekleşme üsteli, ergime noktası, sünekliği, kimyasal afinitesi ve karbür çökelti içeriğinin düşük; bunun yanında elastik modül ve termal iletkenlik katsayısının yüksek olması gerekmektedir. [3]

Nikel bazlı süper alaşımlardaki östenitik nikel matrisin pekleşme üsteli büyüktür ve talaş kaldırma esnasında oluşturulan deformasyon ile pekleşme meydana gelmektedir. Bu nedenle sertliğin artmasına bağlı olarak kesici takım üzerinde oluşan kesme kuvvetleri ve buna bağlı serbest yüzey aşınması da artmaktadır. Aynı zamanda nikel bazlı süper alaşımların sünekliği, yüksek sıcaklık sertliği ve mukavemeti fazladır, bu da takım aşınmasına, deformasyonuna ve sürekli talaş oluşumuna neden olmaktadır. Ayrıca mikroyapı içerisindeki sert karbür parçacıkları kesici takımın aşınmasına ve kırılmasına neden olur. Nikel bazlı süper alaşımların düşük termal iletkenlik katsayısı, kesme esnasında oluşan ısının (~1000 °C) takım üzerinde birikmesine neden olarak takımın sertliğinin düşmesine ve hızlı aşınmasına neden olabilmektedir. Ayrıca krater aşınmasının en büyük sebebi takım yüzeyinde biriken ısıdır. [13]

2.7 Nikel Bazlı Süper Alaşımların İşlenmesinde Kullanılan Takımlar ve Aşınma Tipleri

Süper alaşımların işlenebilirliği, bir önceki kısımda bahsedilen özelliklerinden dolayı zor olduğu için kesici takımlarda deformasyona, kesme kenarında mekanik - termal gerilmelere ve aşırı aşınmaya neden olmaktadır. Süper alaşım işlemede meydana gelen

tipik aşınmalar kesici burunda ve kesme derinliğinde çentikler, serbest yüzey aşınması, krater aşınması, deformasyon ve uç kırılması olarak sıralanabilir [15]. Bu yüzden süper alaşım talaşlı imalatla kullanılacak takımların en önemli özelliği yüksek sıcaklık sertliğinin yüksek olması gerekliliğidir. Kesici takımlarda sıcaklığa bağlı sertlik değişimi ise Şekil 2.14’de verilmiştir.



Şekil 2.14 : Kesici takımlarda sıcaklığa bağlı sertlik değişimi [13].

Şekil 2.14 incelendiğinde süper alaşım için uygun olan kesici takımlar kaplamalı sinterlenmiş karbür, seramik ve CBN takımlardır. Bu yüzden süper alaşım talaşlı imalatla ucuz olması nedeniyle genellikle % 6 Co - % 94 WC içeren düz takımlar ya da % 5-9 arasında Co içeren WC-TiC-TaC kaplamalı takımlar kullanılmaktadır. [13]

3. KESİCİ TAKIMLARA UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ

Kesici takım malzemeleri geçmişten günümüze takım ömrünü artırma gayesiyle araştırmacılar tarafından devamlı olarak geliştirilmeye çalışılmıştır. Fakat takım malzemesinin hacimsel olarak sahip olması gereken mukavemet-sertlik-tokluk sınırlaması ve artık kompozisyon değişimi ile performansının geliştirilemediği durumlarda kaplamaların kesici takımlara uygulanması ön plana çıkmıştır. Özellikle PVD ve CVD gibi kaplama teknolojilerinin gelişmesi sayesinde sert seramik kaplamaların karbür takımlara uygulanması talaşlı imalat performanslarını önemli ölçüde artırmıştır. Takım çelikleri gibi kesici takımlarda ise ısıtılma işlemi yoluyla mikroyapı değiştirilerek hem hacimsel özellikler hem de yüzey özellikleri iyileştirilebilmektedir. Bunun yanında kimi araştırmacılar borlama ve nitrürleme gibi difüzyon proseslerini kullanarak akademik çalışmalarda kesici takımların yüzeyini sertleştirmek suretiyle aşınma dirençlerini iyileştirmişlerdir. Bu bölümde fazla ayrıntıya girilmeden biriktirme ve difüzyon tipi kaplamalardan bahsedilecek ve bölüm sonunda WC-Co kesici takımlar üzerine yapılan borlama çalışmalarına yer verilecektir.

3.1 Biriktirme Kaplamaları

Biriktirme (ing. deposition ya da overlay) kaplamalar, temel olarak kaplanacak malzemenin gaz fazına getirilerek altlık üzerine fiziksel ya da kimyasal tekniklerle tatbikine dayanan yüzey modifikasyonlarıdır. En yaygın kullanılan biriktirme kaplamaları kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD)'dir. Çalışma konusu aslen difüzyon tipi kaplamayı içerdiğinden biriktirme kaplamalarından kısaca bahsedilecektir.

3.1.1 Kimyasal buhar biriktirme (CVD)

Sinterlenmiş karbürler üzerine CVD ile ince film kaplama fikri ilk defa İsviçre Saat Araştırma Enstitüsü tarafından ortaya atılmıştır. Kesici takımlarda ilk CVD kaplama ise, TiC'ün 1960'larda sinterlenmiş karbür üzerine kaplanması ile başlamıştır.

CVD’de takımlar 950 - 1000 °C sıcaklık altında reaktörde kaplanmakta olup TiC kaplamalar için genellikle $TiCl_4$ ve CH_4 gazı, H_2 taşıyıcı gazıyla birlikte sisteme beslenmektedir. Çok tabakalı kaplamalar ise yine tek bir operasyonda sisteme sırasıyla CH_4 gazı verilerek önce TiC, daha sonra N_2 gazı verilerek TiN kaplanabilmektedir. Genellikle bir CVD kaplama prosesi 3 saat ısıtma, 4 saat kaplama ve 7 saat soğutma olmak üzere toplam 14 saat sürmektedir. Kaplama işlemi koruyucu atmosfer ortamında ve vakumda yapılmaktadır. [16]

Genel olarak CVD tekniği ile yapılabilen kaplama türleri TiC, TiN, TiCN, Al_2O_3 , Elmas (ing. diamond like) ve CrC gibi kaplamalardır. Bu kaplamalar genellikle çok katmanlı kaplama şeklinde kesici takımlara uygulanmaktadırlar. [17]

3.1.2 Fiziksel buhar biriktirme (PVD)

1985 yılında CVD’nin beraberinde getirdiği birtakım sorunlar nedeniyle kesici takım kaplamalarında PVD yöntemi kullanılmaya başlanmıştır ve ilk defa TiN kaplamalar PVD ile tek tabaka olarak sinterlenmiş karbürler üzerine kaplanmıştır. PVD kaplamalar CVD kaplamalara göre daha düşük sıcaklıklarda (250 - 750 °C) yapılabilir. Ayrıca PVD yöntemi, CVD’ye göre daha homojen bir kaplama imkanı sunmaktadır. Fakat PVD’de kesici takımın bir yüzeyinin diğerine göre daha kalın kaplanma ihtimali mevcuttur. CVD’de keskin köşelerde meydana gelen çekme gerilmeleri PVD’de basma gerilmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. PVD tekniğinin bir diğer avantajı ise CVD’ye göre daha temiz bir proses olmasıdır. Reaktif sıçratma, reaktif iyon kaplama ve ark buharlaştırma gibi farklı teknikler ile metal (Ti) ya da bileşikler (TiN, TiC gibi) buharlaştırılarak kesici takım üzerine biriktirilebilmektedir. PVD’de de vakum gerekli olup, genellikle CVD tekniğine göre daha ince kaplamalar ($< 3 \mu m$) yapılabilir. Böylece çok katmanlı ya da nano kompozit kaplamalar yapılabilir. [16]

PVD kaplama ile, TiN, TiC, TiCN, AlTiN, CrN, CrC, ZrN ve Al_2O_3 gibi kaplamalar yapılabilir ve bu kaplamalar genellikle çok katmanlı olarak uygulanmaktadırlar. [17]

3.2 Difüzyon Kaplamaları

Difüzyon kaplamalarında C, N ve B gibi atomlar yüzeye yayındırılır ve altlık malzemesinde yer alan atomlarla sert bileşikler oluşturularak yüzey özellikleri iyileştirilir. Bu bölümde, WC-Co kesici takımlara uygulanan, difüzyon kaplama metodları arasından nitrürleme ve borlama yöntemlerine değinilecektir.

3.2.1 Nitrürleme

Nitrürleme, tarihi 1900'lü yıllara dayanan, özellikle çeliklerde, nitrojen atomunun malzemeye taşınımı ile gerçekleşen termokimyasal bir yüzey sertleştirme yöntemidir [16]. Nitrürleme, çeliğin yüksek sıcaklıklara çıkarılıp hızlı soğutulmasına gerek kalmadan ve dolayısıyla distorsiyon problemi oluşturmadan yüzey sertleştirme imkanı sunan bir tekniktir. Nitrürleme özellikle çelik ve dökme demirlerde azotun demir içerisindeki çözünürlüğüne ve difüzyonuna bağlıdır. Difüzyon çeliklerde ferrit bölgesinde gerçekleştiğinden yüksek sıcaklıklara çıkılmasına gerek yoktur. [18]

Çeliklerde nitrürleme sonucunda iki farklı tabaka meydana gelmektedir. Bunlar ϵ (epsilon-Fe₂₋₃N) ve γ' (gama prime-Fe₄N) fazlarından oluşan beyaz tabaka ile genellikle CrN, VN, AlN gibi nitrürlerden oluşan difüzyon tabakasıdır. Beyaz tabaka, yüzeyin tribolojik ve korozyon özelliklerini belirlerken difüzyon tabakası ise sertlik ve mekanik özellikleri belirlemektedir. γ' fazı nispeten daha tok olup ϵ fazı ise sert ve kırılgandır. Aşınma direnci gereken yerlerde ϵ fazı iyi bir aşınma direnci sağlarken ani yüklemelerin olduğu durumlarda istenmez ve yüzeyden taşlanarak kaldırılabilir. Özellikle nitrürlenmiş çeliklerde Cr, V ve Al gibi kararlı nitrür yapıcı elementlerin bulunması gerekmektedir. İşte takım çeliklerindeki nitrürleme ile sertleşme mekanizmasının temeli özet olarak bu şekildedir. [19, 20]

Literatürde nitrürleme üzerine ile yapılan diğer araştırmaların WC-Co sinterlenmiş karbür takımlar için yapıldığı anlaşılmaktadır. Sinterlenmiş karbürlerde N atomunun yüzeye difüzyonu ile yapıda WN, W₂C ve serbest karbon fazlarının meydana geldiği ve bu fazların sertlik artışına neden olduğu belirtilmiştir. [21, 22] Ayrıca, TiC ve TaC içeren WC-Co gibi malzemelerde oluşan TiN'lü difüzyon tabakaları ile iyi bir sertlik artışı sağlandığı belirtilmiştir.

Literatürde dört farklı nitürleme yöntemi mevcuttur. Bunlar gaz nitürleme, tuz banyosunda sıvı nitürleme, plazma nitürleme ve katı nitürlemedir. Bunun yanında plazma destekli iyon aşılama ve lazer nitürleme gibi ileri tekniklerde kullanılan diğer yöntemlerdir. [22, 24] Teknikler borlamada kullanılan tekniklerle benzer olduğundan burada ayrıntılı olarak açıklanmayacaktır.

3.2.2 Borlama

Borlama, bor atomlarının difüzyonu ile yüzeyde sert borür bileşiklerinin oluşturulması suretiyle gerçekleştirilen termokimyasal bir yüzey sertleştirme tekniğidir [25]. Endüstriyel anlamda çelikler 2-10 saat süre ve 850 - 1000 °C sıcaklık aralığında borlanabilmektedir. Borlama genel olarak çelikler, dökme demirler, nikel, kobalt, titanyum, molibden esaslı alaşımlar ile sinterlenmiş karbür gibi bir çok demir esaslı ve demir dışı metallere başarılı bir şekilde uygulanmaktadır [26]. Çeliklerde borlama ile yüzey sertliği 2300 HV'ye kadar çıkabilmektedir. Nitürlemede olduğu gibi borlama yönteminde de çok yüksek sıcaklıklara çıkılmasına ya da hızlı soğutma yapılmasına gerek yoktur. [27]

Demir bazlı alaşımlarda borlama sonucunda oluşan borür fazı FeB ve Fe₂B'den birini veya her ikisini içermektedir. Bu fazlar kolonsal şekilde büyümekte ve yüzey sertliğini artırarak aşınma direnci sağlamaktadır. Genellikle en dış yüzeyde ortorombik kristal yapıda sert FeB fazı, ortada nispeten daha yumuşak hacim merkezli tetragonal kristal yapıya sahip Fe₂B fazı ve bunun sonrasında ise difüzyon bölgesi yer almaktadır. Genellikle her iki fazı birlikte içeren borür tabakalarında fazların ısıl genleşme katsayıları arasındaki fark nedeni ile termal çevrim sonucunda yüzeyde çatlamlar meydana gelebilmektedir. Çeliklerde bor atomu yarıçapının Fe atom yarıçapından % 27 küçük olması nedeniyle bor ara yer veya yer alan atomu olarak çözünebilmektedir. [27, 28]

Borlama prosesinde bor kaynağı olarak amorf bor, B₄C, Na₂B₄O₇, B₂H₆ gibi borlu bileşikler bunun yanında borür tabakasının düzenli gelişmesini sağlayan KBF₄, NH₄F gibi aktivatörler ve borlama sırasında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam sağlayan SiC, Al₂O₃ dolgu ve deoksidanlardan oluşan katkılarda kullanılmaktadır. [29]

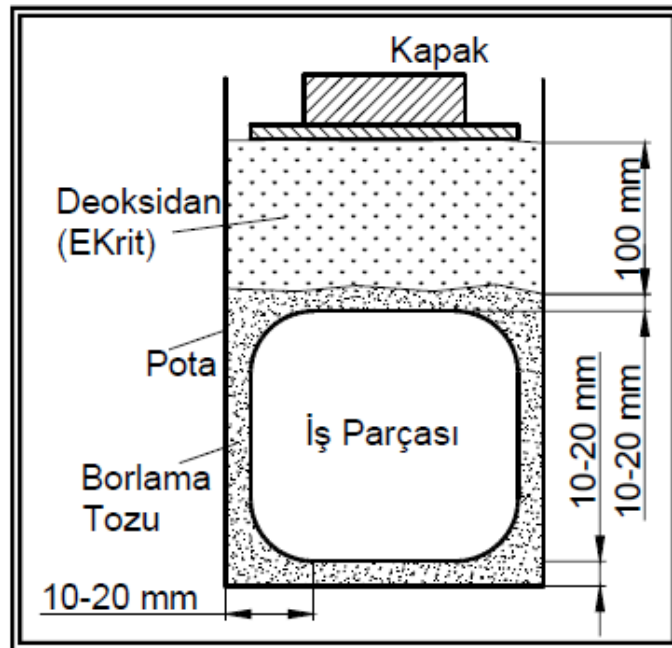
3.3 Borlama Yöntemleri

Literatürde beş farklı borlama tekniği mevcuttur, bunlar katı, sıvı, gaz, plazma ve pasta borlama yöntemleridir.

3.3.1 Katı borlama

Katı borlama yöntemi; toz ya da granüler haldeki bor kaynağının malzemenin etrafını saracak şekilde koruyucu atmosfer içeren bir kapalı kutu içerisinde bulundurulması suretiyle gerçekleştirilmektedir. Borlama sıcaklığı 800 - 1000 °C, borlama süresi ise 2 - 10 saat arasında değişmektedir. [30]

Yöntem basit, ucuz ve ekonomiktir. Bor kaynağının borlanacak malzeme üzerinde en az 10-20 mm kalınlığında bulunması gerekmektedir. Bor kaynağı olarak bor karbür (B₄C), ferrobor ve amorf bor kullanılmaktadır. SiC ve Al₂O₃ gibi katkıları ise borun çözünmesine yardımcı olan dolgu malzemeleridir. NaBF₄, KBF₄, (NH₄)₃BF₄, NH₄Cl, Na₂CO₃, BaF₂ ve Na₂B₄O₇ gibi katkıları ise aktivatör olarak katı borlama işleminde yer almaktadır. Yöntemde kullanılan kapalı kutu; alaşımsız çelik, paslanmaz çelik veya alüminadan imal edilebilmektedir. Katı borlama işleminin şematik gösterimi Şekil 3.1’de verilmiştir. Yöntemin en önemli dezavantajı ise homojen bir borür tabakasının elde edilememesidir. [28, 31]



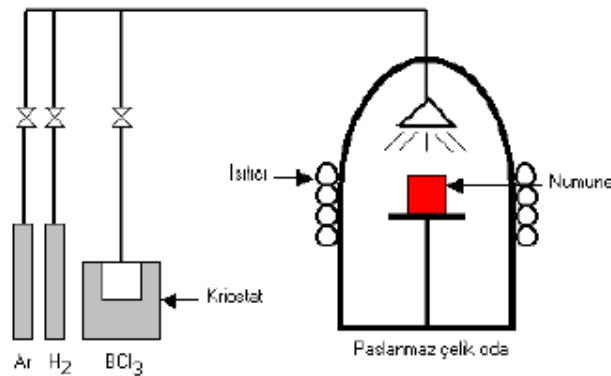
Şekil 3.1 : Katı borlama [28].

3.3.2 Sıvı borlama

Sıvı borlama yönteminde sıvı haldeki borlama banyosu kullanılmaktadır. Borlama işlemi 800 - 1000 °C sıcaklıkta genellikle 2 - 6 saat süreyle uygulanmaktadır. Genellikle boraksın ergimiş banyosunda yapılan sıvı borlama işleminde en önemli kısıt 850 °C'nin altında ergiyik sıvı boraksın akıcılığının azalması ile borlama işleminin imkansız hale gelmesidir. İşlemde bor kaynağı olarak susuz boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), susuz borik asit (B_2O_3), metaborik asit (HBO_2), boraks, bor karbür gibi bor bileşiklerini kullanılır. Redükleyiciler ise SiC, ferrosilisyum, grafit, NaCl ve Al' dir. Borlayıcı ortamın sıvı olması için bor bileşiklerinin veya NaCl gibi tuzların da sisteme ilavesi gerekmektedir. Bu yöntemin bir diğer dezavantajı borlanmış yüzeyde tuz kalıntılarının olmasıdır. Ayrıca borlama işlemini yapacak fırının korozyon önleyici sisteme sahip olması gerekmektedir. Sıvı borlama; normal borlama ve elektrolizle borlama olarak iki farklı biçimde uygulanabilmektedir. [27, 29, 30]

3.3.3 Gaz borlama

Gaz borlamada kullanılan bor kaynakları BF_3 , BCl_3 , B_2H_6 , $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$ gibi bileşikler olup; B_2H_6 , H_2 redüktanı ile birlikte kullanıldığında oldukça iyi sonuçlar verebilmektedir. Yöntemde kullanılan BF_3 , BCl_3 , B_2H_6 , gibi bor halid/diboran gibi bileşiklerin zehirli ve patlayıcı olmaları nedeni ile gaz borlamanın yaygın bir kullanımı yoktur. Yöntemin avantajı ise ulaşılması zor olan bölgelerin borlanması kolaylık sağlaması ve homojen bir borür tabakası elde edilebilmesidir. Borlama işlemi BCl_3 ve H_2 gazları kullanıldığında 750 – 950 °C sıcaklıkta ve 67 kPa basınç altında yapılabilmektedir. Gaz borlama işleminin şematik hali Şekil 3.2'de verilmiştir. [27, 29, 30, 32]



Şekil 3.2 : Gaz borlama [30].

3.3.4 Plazma borlama

Plazma borlama işlemi diğer yöntemlere göre nispeten yeni bir yöntem olup birçok avantajı da beraberinde getirmektedir. Yöntemin temeli bor kaynağı olarak BCl_3 , B_2H_6 , BF_3 veya $\text{B}(\text{OCH}_3)_3$ (trimetilborat) kullanılarak; Ar ve H_2 gazları ile birlikte 800-1000 °C sıcaklıkta, yaklaşık 10^{-2} Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde borlamaya dayanmaktadır. Temel olarak plazma ısı, elektriksel boşalma veya ışın yardımıyla gaz fazındaki maddenin (genellikle Ar) iyonlaştırılması ile elde edilmektedir. İşte oluşturulan bu plazma ile bor atomlarının düşük sıcaklıkta yüzeye homojen şekilde yayılımı sağlanabilmektedir. Fakat bu yöntemin de gaz borlamada olduğu gibi en büyük dezavantajı kullanılan bor halid gazlarının zehirleyici olması ve ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasıdır. [8, 28, 29, 30]

3.3.5 Pasta borlama

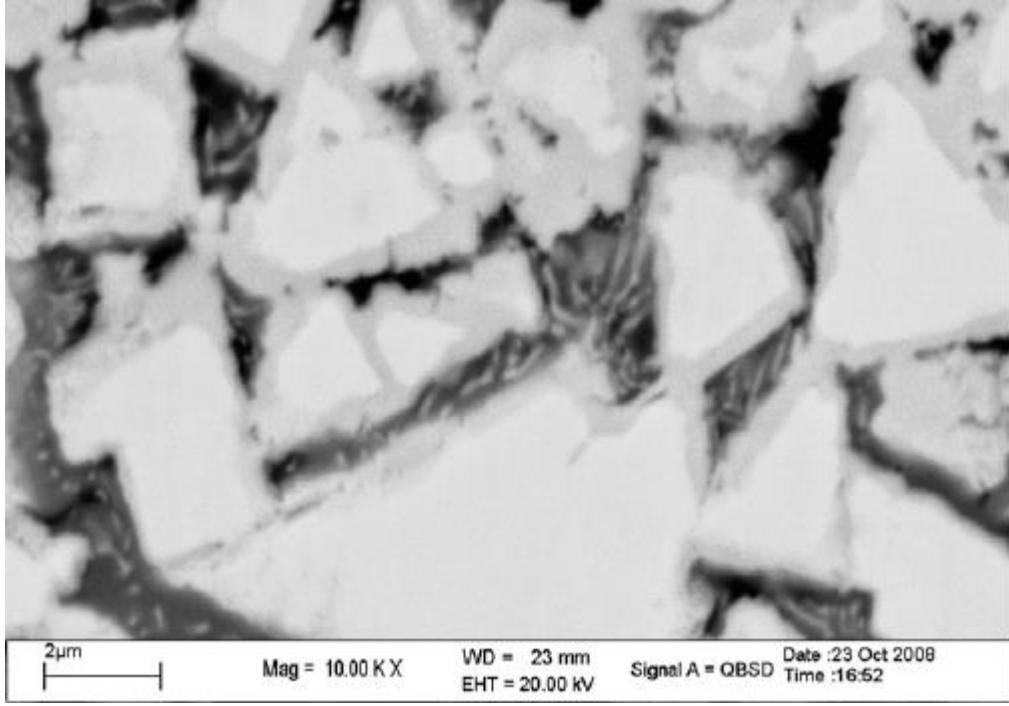
Katı ortam borlamada kullanılan borlayıcıların macun haline getirilerek kullanıldığı pasta borlama yöntemi, kutu borlamanın zor (büyük parçalar), pahalı ve zaman alıcı olduğu durumlarda kullanılmaktadır [28, 29]. Karmaşık geometrili makine parçaları kısmi olarak pasta borlama vasıtası ile borlanabilmektedir. Yöntemde borlayıcı ortam olarak % 45 B_4C ve % 55 kriyolit (N_3AlF_6) ya da bütül asetat içinde çözünmüş nitro selüloz bağlayıcı ve geleneksel borlama tozu karışımı (B_4C -SiC-KBF₄) kullanılabilir. Pasta, borlanacak metal üzerine sürülerek ya da püskürtülerek 1-10 mm kalınlığında bir tabaka oluşturulur ve kurutulur. Daha sonra ise borlanacak malzeme 800 - 1000 °C sıcaklıkta 2 ile 10 saat arasında koruyucu atmosfer altında borlama işlemine tabii tutulmaktadır. Koruyucu atmosfer olarak Ar ya da N_2 gazı kullanılabilir. [33]

3.4 WC-Co Kesici Takımlar Üzerine Yapılan Borlama ve Nitrürleme Çalışmaları

Bu kısımda literatürde çokta yaygın çalışılmamış olan WC-Co kesici takımların difüzyon kaplanması üzerine yapılmış belirli çalışmalar ve elde ettikleri sonuçlar özetlenmeye çalışılacaktır. Bunun için tarih sırasına göre öncelikle borlama üzerine yapılan çalışmalar, daha sonra ise nitrürleme üzerine yapılan birkaç çalışmaya yer verilecektir.

Borlama alanda yapılan en güncel çalışma 2013 yılında Guobiao ve arkadaşlarının [34], YG11 (% 11 Co içeren) WC sinterlenmiş karbürlerle; B_4C , KBF_4 , SiC , Al_2O_3 , Mg tozu, grafit partikülleri ve nadir toprak elementlerinden oluşan bir borlayıcı ortamda, Ar ve H_2 koruyucu atmosferinde, 950 °C sıcaklık ve 5 saat süre altında yaptıkları borlama işlemidir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada borlayıcı ortam bileşenlerinin borür tabaka oluşumuna ve tabakada hangi fazların meydana geldiğine olan etkisini SEM, XRD ve optik mikroskop gibi teknikler kullanılarak incelemişlerdir. Daha sonra, borlanmış karbür numuneler abrazyon aşınması test cihazında performans analizine tabii tutmuşlardır. Çalışmada altı farklı borlayıcı ortam kullanılarak borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. İlk dört borlama deneyinde B_4C , KBF_4 ve grafit partiküllerinin borlamaya olan etkisi, son iki deneyde ise SiC ve Al_2O_3 'den hangisinin en iyi doldurucu malzeme olduğu saptanmaya çalışılmıştır. İlk deneyde bor kaynağı olarak sadece % 25 B_4C ve % 35 KBF_4 kullanan çalışmacılar XRD ile yaptıkları analizde yapıda sadece CoB fazına rastlamışlardır. Burada B_4C ve KBF_4 'den B atomunun oluşarak WC partikülleri arasındaki Co fazı ile birleştiğini ve yüzeyde ortalama 25 μm 'lik bir borür tabakasının bulunduğunu kaydetmişlerdir. % 100 KBF_4 'ü kullandıkları 2. deneyde ise borlanmış tabakanın olmadığı fakat XRD sonuçlarına göre oluşan B atomunun yüzeydeki Co fazını gidererek herhangi bir borür bileşiği meydana getirmediğini vurgulamışlardır. Burada tam net emin olmamakla birlikte Co fazının BF_3 ile bir gaz bileşik oluşturup ortamdaki uzaklaştığını iddia etmişlerdir. % 100 B_4C kullandıkları 3. deneyde ise XRD ile herhangi bir faz saptayamamışlar fakat literatürdeki bir çalışmada borür fazının oluştuğunu ima etmişler ve 10-20 μm ince bir tabaka olması nedeni ile XRD'de faza ait bir pik bulamadıklarını söylemişlerdir. 4. deneyde ise 1. deneyde kullandıkları kompozisyona % 40 grafit eklemişler ve yine 1. deneyde olduğu gibi CoB fazı ve benzer bir tabaka kalınlığı elde etmişlerdir. Fakat borür tabakasında çatlakların oluştuğunu ve buna da aşırı grafitin neden olduğunu ileri sürmüşlerdir. 5. deneyde ise 1. deneyde kullandıkları kompozisyona ilave olarak Al_2O_3 kullanan araştırmacılar herhangi bir borür tabakası oluşmadığını görmüşler XRD ile yüzeyde sadece oksit oluştuğunu saptamışlardır. Bununla birlikte küçük Al_2O_3 partiküllerinin gaz geçirgenliği ve ortamın yeterince inert hale getirilememesi yüzünden olduğunu iddia etmişlerdir. Son deneylerinde ise 1. deneyde kullandıkları kompozisyona 10:30 oranında grafit ve SiC doldurucu ilave etmişler ve XRD ile yüzeyde BCo_2 fazının saptayarak 20 μm 'lik iyi bir borür tabakası

elde etmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar dirençle ısıtma yerine indüksiyonla ısıtmanın daha yüksek bir borür tabakası sağladığını belirtmişlerdir. İlave olarak Ar yerine H₂ kullanılması borür tabaka kalınlığını 2-3 kat artırdığını saptamışlardır. Yine H₂ atmosferi altında yaptıkları analizlerde WC tanelerinin etrafında CoW₂B₂ fazının olduğunu saptamışlardır ve bu faz açık gri WC tanelerinin etrafında ince bir koyu gri tabaka ile 10000x büyütmede (Şekil 3.3) görülebilmışlerdir. [34]



Şekil 3.3 : Guobiao ve arkadaşlarının WC taneleri etrafında saptadıkları CoW₂B₂ fazının SEM görüntüsü [34].

Guobiao ve arkadaşları borlama mekanizması için sadece KBF₄'ün yetmediğini, B₄C ile birlikte kullanıldığı takdirde aşağıdaki reaksiyonlar uyarınca BF₃ ve atomik B oluştuğunu belirtmişlerdir. [34]



Ve oluşan B atomunun WC-Co yüzeyinde çok ince bir tabakada aşağıdaki reaksiyon uyarınca CoB ve CoB₂ oluşturduğunu aktarmışlardır. [34]



Bor atomu daha derinlere nüfuz ettiğinde ise, CoW_2B_2 , CoWB ve çok az miktarda Co-C-W-C 'den oluşan bir yapıyı rapor etmişlerdir. Aşınma test sonuçlarına göre borlanmamış karbürü göre % 30 iyileşme sağlamışlardır. [34]

2010 yılında Wei ve diğerlerinin [35] yaptığı çalışmada farklı ön işlemler yapıldıktan sonra WC-Co altlıklar üzerine sıcak filamanlı CVD yöntemi ile mikro ve nanokristalin elmas kaplamışlardır. Burada yaptıkları ön işlemlerden biriside borlama olup, % 13 Co içeren WC altlıklar önce 740°C 'de B_2O_3 (boraks) tamamen ergiyene kadar 1,5 saat tutulmuş ve bu ergiğin içerisine SiC, KCl, Na_2AlF_6 , B_4C , Cr_2O_3 ve aktif karbon ilave edilerek karışım 950°C 'de 1.5 saat tutulmuştur. Daha sonra bu WC-Co ve ergiyikten oluşan sistem 950 ile 1000°C 'de 4 saat fırında tutularak borlanmıştır. Yaptıkları XRD analizinde borlanmış tabakada CoW_2B_2 , WC ve çok az miktarlarda CoB ile CoWB bulunduğunu saptamışlardır. Ayrıca yapı % 13 Co içermesine rağmen herhangi bir Co piki görmemişlerdir. Ve yüzeye yakın bölgelerdeki Co'nun Co-W-B üçlü fazını oluşturarak elmas filmin büyüme morfolojisine olumlu etkilediğini savunmuşlardır. Borlanmış WC-Co 'da elmas çekirdeklenmesinin daha çok olduğu, bunun da nedeninin serbest Co atomunun B ve W atomuyla birleşmesi ile üçlü bileşik meydana getirmesi ve 900°C gibi yüksek sıcaklıklarda Co'nun yüzeye olan difüzyonunu engellenmesi olduğu belirtilmiştir. [35]

Baştürk ve arkadaşları [1]; plazma ortamında borlanmış WC-Co kesici takımlar ile Ti-6Al-4V işlenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada; % 10 BF_3 , % 40 Argon ve % 60 H_2 gazlarının bulunduğu vakum ortamında WC-Co kesici takımları değişik sıcaklık ve sürelerde borlama işlemine tabi tutmuşlardır. Borlanan kesici takımlarda maksimum borür tabaka kalınlığı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak $185\ \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Çalışmada, borlama yapılmayan kesici takımdaki mikrosertlik değeri 1448 HV iken, borlanmış takımlarda en yüksek mikro sertlik değeri 3100 HV olarak ölçülmüştür. Takımların performansı tornalama ve yüzey frezeleme operasyonları ile test edilmiştir. Farklı süre ve sıcaklıklarda borlanan 4 farklı kesici takımın serbest yüzey aşınması değerleri borlama yapılmayan kesici takım ile karşılaştırılmış, bunun yanında kesme kuvvetlerindeki değişimler elde edilmiştir. Burada en yüksek takım ömrü en düşük işlem sıcaklığında (600°C) ve en yüksek işlem süresinde (6 saat) plazma borlamaya maruz kalan takımlarda olduğu görülmüştür. Bu şartlar altında borlanan torna takımı ile borlanmamış torna takımının

kesme kuvveti arasında herhangi bir fark oluşmaz iken, borlanan freze takımlarında borlanmayanlara göre oluşan maksimum kuvvetler % 21 azalmıştır. Çalışma sonucunda kesici takımlarda % 5 maliyet düşüşü sağlayan bir proses geliştirilmiştir.[1]

Oruç; 2006 yılında yaptığı yüksek lisans çalışmasında [8], ISO P25, WC-Co kesici takımları sırasıyla 900°C, 1000°C ve 1100°C sıcaklıklarda 1- 2- 4 saat sürelerde sıvı ortamda borlama işlemine tabi tutulmuştur. Araştırmacı; borür tabakalarının zaman ve sıcaklığa bağlı olarak kalınlıklarını ve yüzeyden itibaren matrise doğru sertlik dağılımlarını ölçmüş ve torna tezgahında 145 HV sertliğe sahip AISI 1010 çeliğini işleyerek kesici takımların aşınma özellikleri ve kesme kuvveti analizlerini yapmıştır. Çalışma sonuçlarına göre artan sıcaklık ve işlem süresine bağlı olarak borür tabaka kalınlığının arttığı rapor edilmiştir. Yapılan incelemelerde yüzeydeki sertlik değerinin altlık sertliğinden yaklaşık 2,5 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Yapılan XRD analizlerinde yapı içerisinde çoğunlukla W_2B_5 fazının olduğu, bunun yanında CoW_2B_2 , $CoWB$, CoB , W_3CoB_3 , TiB_{25} , TiB_{100} , Ta_3B_4 , WB_4 fazlarının da bulunduğu aktarılmıştır. 5 dakikalık işleme sonucu borlanmış kesici takımlarda borlanmamış kesici takımlara göre daha fazla aşınma meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca kesici takım aşınması kırılma ve tabaka halinde kalkma şeklinde olmuş, bunun da aşırı sert borür tabakası nedeniyle meydana geldiği ileri sürülmüştür. Borlanmış takımlardaki kesme kuvvetleri ise borlanmamış takımlardaki kesme kuvvetlerinden % 10 daha fazla çıkmıştır. Bunun yanında borlanan kesici takımlar ile işlenen iş parçasının yüzey pürüzlülüğü borlanmamış takıma göre % 56 daha iyi çıkmıştır. [8]

Hamzaoglu; 2008 yılında yaptığı yüksek lisans çalışmasında [22], talaş kaldırmada kullanılan sinterlenmiş karbür kesici uçları farklı sıcaklık ve işlem süreleri altında plazma nitrüleyerek uçların performansını incelenmiştir. Araştırmacı çalışmasında % 8 Co içeren WC-Co kesici takım kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, nitrürlenmiş kesici takımların sertliklerini ölçmüş ve XRD ile faz analizlerini yapmışlardır. Çalışmada, talaş kaldırma deneyleri, GG 25 döküm iş parçasının CNC dik işleme merkezinde delik genişletme operasyonu ile yapılmış böylece kesici uçta oluşan aşınma miktarı ağırlık kaybı metodu ile hassas terazi ile ölçülerek bulunmuştur. Çalışma sonuçları incelendiğinde en yüksek yüzey sertliği 700 °C’de 2 saat nitrürlenmiş kesici takımda (2709 HV_{0.3}) meydana gelmiştir. XRD sonuçlarına göre nitrürlü tabakada WN bulunduğunu rapor edilmiştir. Minimum yüzey sertliği ise (1767 HV_{0.3}) 500 °C

nitrürleme sıcaklığında 2 saat süren nitrürleme sonrasında elde edilmiştir. Numuneler üzerinde yapılan talaş kaldırma deneyleri sonucu kesici ucun performansı toplamda yaklaşık % 44 artış ile % 53 düşüş göstermiştir. Maksimum artış 600 °C nitrürleme sıcaklığında 4 saat süren nitrürleme sonrasında, maksimum düşüş ise 700 °C nitrürleme sıcaklığında 9 saat süren nitrürleme sonrasında olduğu aktarılmıştır. [22]

Saklakoğlu ve arkadaşları, 2006 yılında yaptıkları çalışmada [24], plazma ortamında iyon aşılama yöntemiyle azot aşıl原因mış WC-Co kesici takımların ömürlerini araştırmışlardır. ISCAR marka IC50M kalitesinde ve SCMT 09T308 geometrisine sahip kesici takımlar farklı sıcaklık ve işlem sürelerinde azot aşılama işlemine tabi tutmuşlardır. Talaş kaldırma işlemlerini universal torna tezgahını kullanılarak gerçekleştiren araştırmacılar, iş parçası olarak AISI 4140 çeliği kullanmışlardır. Çalışmada serbest yüzey aşınma değeri $V_b=0,3$ mm olduğunda kesici takımlar aşınmış kabul edilmiştir. Ayrıca işlem sonrasında kesilen parçanın yüzey pürüzlülüğü de ölçülmüştür. Çalışmada en iyi sonuçlara 380 °C’de 5 saat azot aşılama işlemi gören takım ile ulaşılmış olup takım ömrünün yaklaşık % 85 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bunun yanında iş parçasının yüzey pürüzlülüğünde iyileştiği rapor edilmiştir. [24]

Özdemir ve arkadaşları, 2004 yılında yaptıkları çalışmada [36], talaş kaldırmada kullanılan sinterlenmiş karbür sert metal plakette, değişik nitrürleme şartları altında plazma nitrürlenmişler ve belli talaş kaldırma şartları altında kullanarak plakette meydana gelen serbest yüzey aşınma miktarlarını tespit etmişlerdir. Karbür plakette yatay işleme tezgahında alın frezeleme operasyonunda denenmiştir. İşlenecek malzeme olarak SAE/AISI 1020 (DIN Ck 22) çeliği seçilmiştir. Nitrürleme sonrasında en yüksek yüzey sertliği 700 °C’de 2 saat işlem süresinde, % 75 H₂ ve % 25 N₂ plazma atmosferinde elde edilmiştir. Daha sonra yapılan talaş kaldırma deneyleri en düşük serbest yüzey aşınmasının 700 °C’de 2 saat işlem süresinde, % 75 H₂ ve % 25 N₂ plazma atmosferinde nitrürlenmiş kesici takımda, en yüksek serbest yüzey aşınmasının da 500 °C’de 1 saat işlem süresinde % 50 H₂ ve % 50 N₂ plazma atmosferinde nitrürlenmiş kesici takımda meydana geldiği anlaşılmıştır. Çalışma sonuçları göstermiştir ki nitrülenmemiş plakete göre, plazma nitrülenmiş plakette plazma nitrürleme şartlarına bağlı olarak serbest yüzey aşınmasında yaklaşık % 3,6 ila % 81,3 arasında iyileşme sağlanmıştır. Nitrürleme parametreleri arasında (nitrürleme süresi, nitrürleme sıcaklığı ve gaz karışım oranı) serbest yüzey aşınma miktarının değişiminde

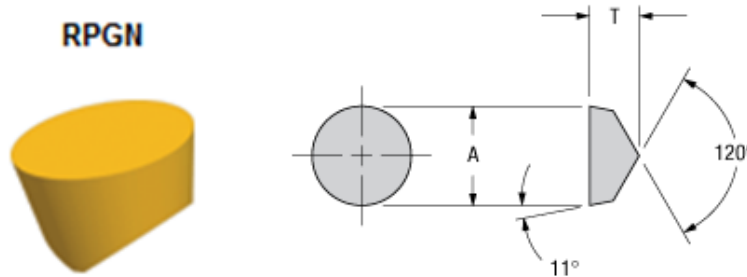
en etkili olan parametrelerin sırasıyla nitrürleme sıcaklığı, gaz karışım oranı ve nitrürleme süresi olduğu çalışma sonucunda belirtilmiştir. [36]

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan kesici takım tanıtılmış, borlama yöntemi anlatılmış ve deneysel parametreler ile birlikte borlanmış takımlara yapılan mekanik ve metalurjik karakterizasyon testleri hakkında bilgiler verilmiştir.

4.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzeme

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen borlama deneylerinde, Tusaş Motor Sanayi (TEİ) imalat departmanında, Inconel 718 süper alaşım malzemeden imal uçak motoru parçalarının tornalanmasında kullanılan % 94 WC ve % 6 Co içerikli V yataklı bilenmiş yuvarlak kesici takım kullanılmıştır. Kesici takım fabrika bünyesindeki takım bileme atölyesinden bilenmiş olarak temin edilmiştir. Orjinal kesici takım kaplamalı olarak TEİ'ye gelmekte olup kaplamalı takımlar bileme atölyesinde taşlanarak (boy ve çapları küçültülerek) tekrar kullanılmaktadır ve bilenmiş takımlarda herhangi bir kaplama da bulunmamaktadır. Çalışmadaki borlama deneylerinde kullanılan takımın geometrisi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Borlama deneylerinde kullanılan kesici takım geometrisi.

Bu tez çalışmasında özellikle bu takımın seçilmesinin nedeni kaplamasız olarak kolayca temin edilebilmesidir. Takım V yataklı olup, iki taraflı olarak kullanılabilir. Takım taşlama sonrasında parlak bir yüzeye sahip olup yüzeylerde sadece bir kısım taşlama izleri bulunmaktadır. Bu nedenle takımlar borlama deneyleri öncesinde herhangi bir parlatma işlemine tabii tutulmamıştır. Takımın yüksekliği (T) 4.74 mm, çapı (A) 6.35 mm ve ön boşluk açısı ise 11° dir. Takım “S grade” olup ANSI standartlarında süper alaşım talaşlı imalatı için üretilen

karbürlerin sınıfını belirtmektedir. Takımın borlama öncesi görüntüsü Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 : Borlama deneylerinde kullanılan kesici takım görüntüsü.

4.2 Borlama Yöntemi

Çeşitli borlama yöntemlerinden Bölüm 3.3’de ayrıntılı olarak bahsedilmiştir. Bu tez çalışmasında ise kesici takımların borlanmasında pasta borlama yöntemi kullanılmıştır. Yöntemde bor kaynağı olarak (EkaGermany®) macun şeklindeki pasta kullanılmıştır. Öncelikle 40 mm iç çapa sahip 2 adet çelik halka 8 mm yüksekliğinde kesilerek iç yüzeyleri parlatılmıştır. Bu halkalar daha sonra yanyana iki adet halkanın sığabileceği bir refrakter üzerine yerleştirilerek pasta ile takımların fırın içerisine yerleştirilebilmesi mümkün hale getirilmiştir. Şekil 4.3’de borlama deneylerinde kullanılan halkalar ve refrakter görülmektedir.



Şekil 4.3 : Borlama deneylerinde kullanılan halkalar ve refrakter.

Pasta; önce halkaların yarısına kadar doldurulmuş ve kesici takımların V-yatak kısmı, bu yarıya kadar doldurulmuş pasta içerisine batırılarak dik halde durması sağlanmıştır. Daha sonra ise halkalar içerisine takım yüzeyinde yaklaşık 3 mm kalınlığında pasta

bor tabakası olacak şekilde pasta ilavesi yapılmıştır. İlave yapıldıktan sonra macun şeklindeki pasta içerisindeki suyun giderilmesi için halkalar ve refrakter, etüv’de 250 °C sıcaklıkta 15 dakika süre ile kurutma işlemine tabii tutulmuştur. Kurutma sonrası borlama düzeneğinin görüntüsü Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4 : Etüvde kurutma sonrası borlama düzeneğinin görünüşü.

Etüvde kurutulan pasta ve halkalar refrakter ile birlikte tüp fırın içerisine konulmuştur. Şekil 4.5’de kullanılan tüp fırın görülmektedir. Tüp fırının sol tarafındaki kapak sökülerek koruyucu refrakter çıkarıldıktan sonra borlama düzeneği fırının orta kısmına kadar sürülerek yerleştirilmiştir. Daha sonra koruyucu refrakter tekrar fırın tüpü içerisine yerleştirilmiş ve kapak kapatılmıştır. Fırın tüpü ve gaz sağlayıcı borular içerisindeki havanın atılması için fırın önce vakuma alınmış ve vakum esnasında sisteme argon beslenmiştir. Argon çıkışı görebilmek için gaz çıkışı bir hortum vasıtasıyla beher içerisindeki suya verilmiştir. Daha sonra fırın programı ayarlanarak istenilen sıcaklığa 10 °C/dakika ısıtma hızında gelmesi sağlanmış ve borlama işlemi sonlandığında, soğuma fırının kendi haline bırakılması suretiyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5 : Borlama işleminin yapıldığı tüp fırın.

Borlanan kesici takımlar fırın soğuduktan sonra fırın içerisinden çıkarılmıştır. Bu esnada katılaştan pasta ile halkaların birbirinden ayrılması zor olmuştur. Bunun için çekiç ve pens vasıtası ile takımların içinde bulunduğu pasta halkalardan ayrılmış ve dikkatli şekilde küçük parçalara ayrılarak içerisindeki borlanmış kesici takımlar çıkarılmıştır. Kesici takımların pasta içerisinden çıkarıldığı esnadaki görüntüsü Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6 : Borlama sonrası pastanın kırılarak kesici takımların çıkarılması esnasındaki görüntü.

Pasta borlama sonrasında takım yüzeylerinde herhangi bir kalıntıya rastlanmamıştır, yüzeyler sadece bir bez vasıtası ile temizlenmiştir. Şekil 4.7’de pasta içerisinden çıkarılan ve temizlenmeden önceki kesici takımların görüntüsü verilmiştir. Takımların üzerinde herhangi bir kalıntı görülmemekte, sadece renk değişikliği göze çarpmaktadır.



Şekil 4.7 : Pasta borlama sonrası borlanmış kesici takımların görüntüsü.

4.2.1 Borlama parametreleri

Bu tez kapsamında kullanılacak optimum deney parametrelerinin belirlenmesinde literatürde verilen sıcaklık ve süreler ile ön borlama deneyleri yapılmıştır. Yapılan ön borlama çalışmaları sonrasında bulunan 5 farklı sıcaklık ve 2 farklı süre, borlama deney parametreleri olarak belirlenmiş ve bu parametreler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Borlama deneylerinde kullanılan parametreler.

Borlama sıcaklığı (°C)	Süre (saat)
800	8
850	4
900	4
	8
1000	4
	8
1100	4
	8

4.3 Yapısal ve Mekanik Karakterizasyon Çalışmaları

4.3.1 Metalografik çalışmalar ve borür tabaka kalınlıklarının belirlenmesi

Borlanmış takımlarda oluşan borür tabaka kalınlıkları optik mikroskop ve SEM kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için öncelikle metalografik çalışmalarda kullanılmak üzere kesici takımların kesitleri alınmıştır. Takımların sert ve küçük olması nedeniyle kesit alma işlemi takımların yarıya kadar elmas taşlama tezgahında taşlanması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Numunede herhangi bir ısıdan etkilenmiş bölge oluşturmamak için taşlama esnasında bor katkılı soğutma sıvısı da kullanılmıştır. Yarıya kadar taşlanan kesici takımlar TEI bünyesindeki metal laboratuvarı imkanları kullanılarak bakalite alınmıştır. Takımların çok sert olması nedeniyle parlatma esnasında kenar yuvarlanmasını önlemek için DuroFast® marka sert numuneler için geliştirilmiş sıcak bakalit tozu kullanılmıştır. Bakalite alınmış kesici takımın kesit hali Şekil 4.8’de görülmektedir. Kesici takımların parlatma işlemi, sırası ile 300, 600, 800 ve 1200 nolu metal zımparalar ve elmas pasta kullanılarak otomatik parlatma cihazında gerçekleştirilmiştir. Takımların sert olması ve kenar yuvarlanması probleminin yaşanması nedeni ile zımparalama işlemlerinde kağıt zımpara kullanılamamıştır. Dağlama işlemi ise, 10 gr KOH, 100 ml su ve 10 gram $K_3Fe(CN)_6$ ’dan oluşan çözelti kullanılarak (Murakami çözeltisi) 5 dakika süreyle ve dalma metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8 : Sıcak bakalite alınmış kesici takımın kesit görünüşü.

Dağlanan kesici takımlar öncelikle optik mikroskopta incelenmiş, fakat 500x büyütmede özellikle borür tabakası ince olan takımlarda ($10\ \mu\text{m}$ gibi) tabakanın görülmesinin zor olması nedeniyle mikroyapı incelemelerinin taramalı elektron mikroskobunda (SEM) yapılması kararlaştırılmıştır. Çünkü optik mikroskopta en ufak bir kenar yuvarlanması bile borlanmış tabakadan görüntü alınmasını bir hayli zorlaştırmaktadır. Bu nedenle dağlanmış kesici takımlar altın kaplanarak 1500x büyütme ile Hitachi TM-1000 TableTop taramalı elektron mikroskobunda (Şekil 4.9) mikroyapı incelemesine tabii tutulmuştur. Burada borür tabaka kalınlıkları belirlenmiştir.



Şekil 4.9 : Borür tabaka incelemesinde kullanılan SEM cihazı.

4.3.2 XRD ölçümleri

WC-Co kesici takımlardaki borür tabakasında oluşan fazların belirlenmesi için kesici takımlara XRD analizi yapılmıştır. Borlanmamış ve farklı parametreler altında

borlanmış takımların XRD analizi, takım üst yüzeyinden, 10° ile 90° tarama açısında, 2°/dakika tarama hızı ile GBC MMA marka XRD cihazında (Şekil 4.10) yapılmıştır.



Şekil 4.10 : XRD analizlerinde kullanılan cihaz.

4.3.3 SEM çalışmaları ve EDX analizleri

Borür tabakasındaki mikroyapıyı daha ayrıntılı incelemek ve bor atomunun nüfuz ettiği bölgeleri belirlemek amacıyla daha yüksek büyütmelerde Bölüm 4.3.1’de belirtilen SEM cihazı ve bu cihazın daha gelişmiş bir versiyonu olan Philips XL30 marka EDX modülüne sahip SEM cihazı birlikte kullanılmıştır. Nokta EDX analizleri ile bor atomunun WC taneleri ya da matris içerisine mi difüze ettiği öğrenilmeye çalışılmıştır. Çizgisel EDX analizi sonuçlarından faydalanılarak ise altlıktan borür tabakasına geçişte ve borür tabakası içerisinde bor konsantrasyonunun nasıl bir değişim sergilediği irdelenmiştir.

4.3.4 Sertlik ölçümleri

Borlanmış kesici takımların sertlik testleri Schimadzu marka Vickers sertlik ölçüm cihazında (Şekil 4.11) gerçekleştirilmiştir. Takımlarda elde edilen borür tabaka kalınlığı nispeten ince olduğundan ve mevcut ölçüm cihazının hassasiyetinin yetersiz olmasından dolayı kesitten sertlik ölçümleri alınamamıştır. Bu nedenle her bir kesici

takımın üst yüzeyleri temizlenerek (parlatılmadan) 6 farklı noktadan 1 ve 2 kg yük altında ölçümler alınmıştır. Borlanmış tabakanın ince olması ve yüzeyden kalması endişesinden dolayı takımlar parlatılmamıştır. Bu nedenle küçük yüklerde sertlik izinin yeterince net görülememesinden dolayı 1 kg altındaki yükler, sertlik testlerinde tercih edilmemiştir. Kesici takımların oturma yüzeylerinin V şeklinde olması nedeniyle sertlik ölçümü için takımlar bakalite alınmıştır.

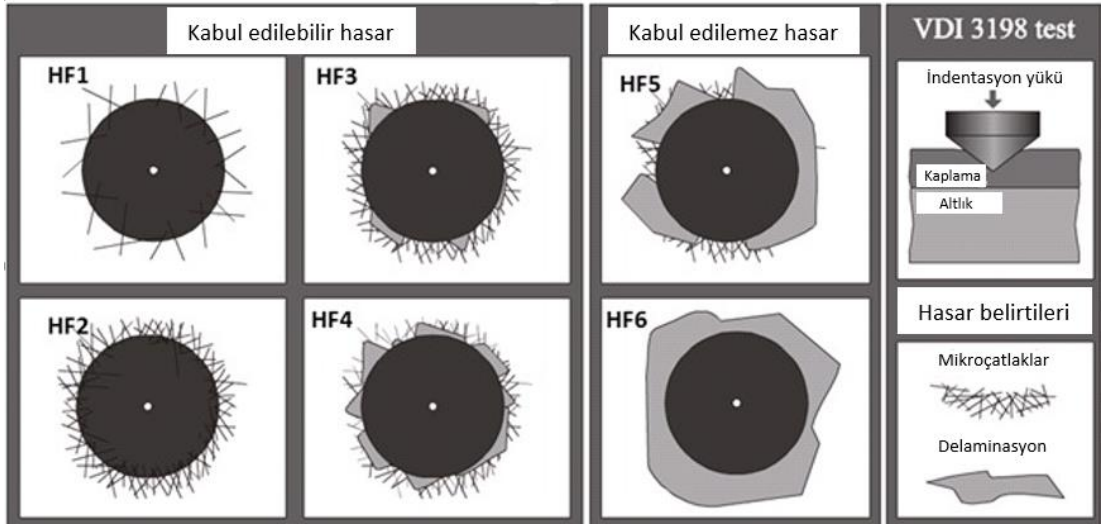


Şekil 4.11 : Borlanmış kesici takımların yüzey sertlik ölçümünde kullanılan Vickers sertlik cihazı.

4.3.5 Borür tabakalarına uygulanan yapışma testleri

Rockwell kaplama yapışma testi genellikle PVD kaplamaların yüzeye yapışma kabiliyeti hakkında bilgi veren Alman mühendislerin kullandığı bir test tekniği olup Rockwell adhezyon testi ya da Mercedes testi olarak da literatürde geçmektedir. Borlanmış tabakanın WC-Co kesici takım ile uyumunun ve yapışma kabiliyetinin saptanabilmesi, sıcaklık ve süreye bağlı olarak kaplamanın adhezyonunun ne yönde etkilendiğini anlamak için bu testin yapılması öngörülmüştür. Yöntemde sertlik için bakalite alınmış numuneler Rockwell sertlik cihazında 150 ve 60 kg yük altında elmas koni uç ile indentasyona tabii tutulmuştur. Daha sonra oluşan iz optik mikroskopta 100x büyütmede “Verein Deutscher Ingenieure 3198 (VDI)” standardında belirtilen

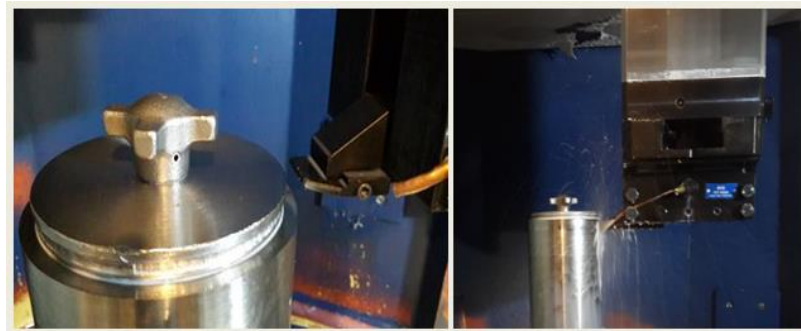
altı farklı hasar seviyesi açısından karşılaştırılmıştır. Adhezyon seviyelerini gösteren skala Şekil 4.12’de verilmiştir.



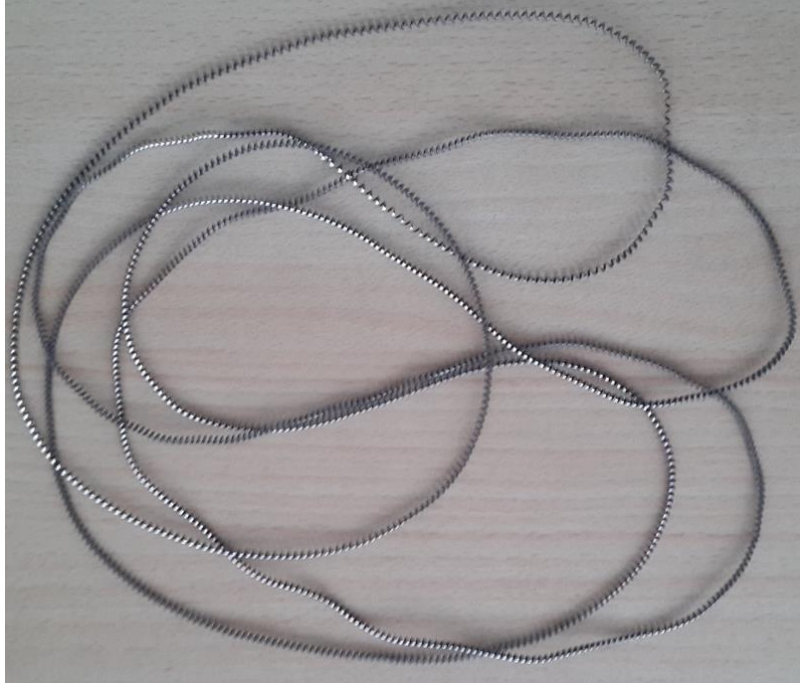
Şekil 4.12 : Kaplama yapışma kabiliyetini belirlemede kullanılan hasar tipleri skalası [37].

4.4 Takım Aşınması Test Yöntemi

Borlanmış kesici takımların aşınma testleri TEI bünyesindeki HNK marka dik torna tezgahında Inconel 718 şaft parçasının (yaşlandırılmış ve ortalama sertliği 45 HRC) kaba tornalama operasyonunda gerçekleştirilmiştir. Borlanmış kesici takımlar önce takım tutucuya bağlanmış ve takım tutucu tezgah kolonuna monte edilmiştir. Takımlar Şekil 4.8’de gösterildiği üzere belli bir boydaki Inconel 718 şaft üzerinde, tek paso geçişiyle yüzeyden talaş kaldırmak suretiyle aşınma testine tabii tutulmuştur. Her borlanmış takımın farklı iki yüzü kullanılarak iki kez kesim yapılmıştır. Kesim esnasında bor katkılı soğutma sıvısı kullanılmıştır. Kesimlerde çıkan talaş sürekli talaş olup Şekil 4.14’de talaş geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 4.13 : Borlanmış takımların aşınma testlerinin yapıldığı iş parçası ve tezgah.



Şekil 4.14 : Inconel 718 şaft parçasının borlanmış takımlar ile denenmesi esnasında ortaya çıkan talaş geometrisi.

4.4.1 Aşınma (kesme) testi parametreleri

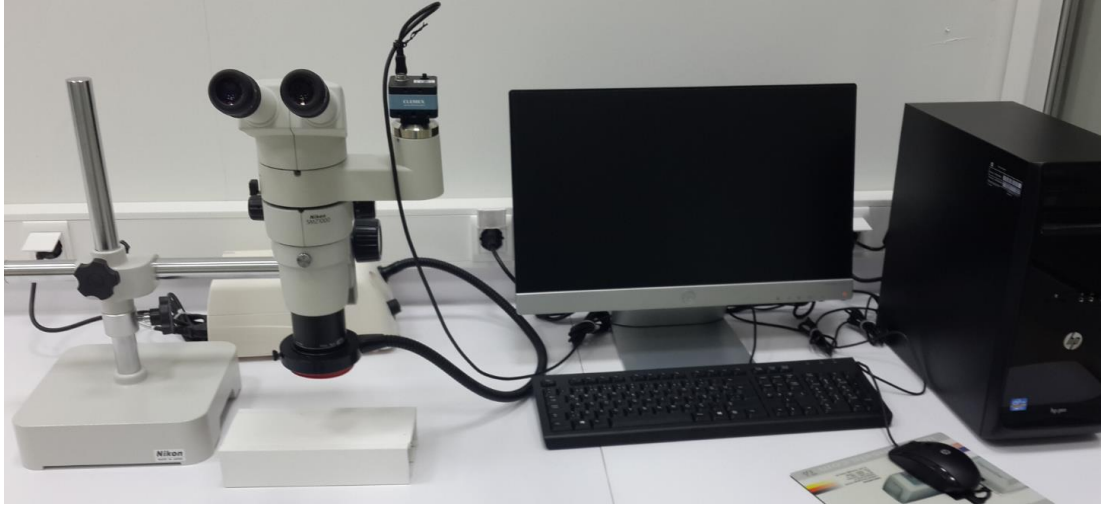
Borlanmış takımların saha testlerinde, dik torna tezgahında kullanılan kesme testi parametreleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Tüm denemelerde takım aşınmasını karşılaştırmak için aynı kesim parametreleri kullanılmıştır. Parametrelerin belirlenmesinde takımın daha önce kullanıldığı kesme operasyonu bilgilerinden faydalanılmıştır.

Çizelge 4.2 : Aşınma testlerinde kullanılan parametreler.

Parametreler	Değer
İlerleme (f)	0.006 inç
Kesme hızı	160 SFM
Kesme derinliği	0.01 inç
Kesme boyu	2.5 inç
Soğutma suyu basıncı	4 bar

4.4.2 Aşınma Ölçümleri

WC-Co kesici takımların performanslarının belirlenmesinde Bölüm 2.3’de ayrıntılı olarak açıklanan serbest yüzey aşınmalarının miktarlarına bakılmıştır. Bunun için TEI Arge laboratuvarı bünyesindeki Nikon SMZ1000 marka stereo mikroskop (Şekil 4.15) kullanılarak kesici takımların aşınma testi sonrasında serbest yüzey aşınmaları ölçülmüştür.



Şekil 4.15 : Kesici takım aşınma ölçümlerinin yapıldığı stereo mikroskop.

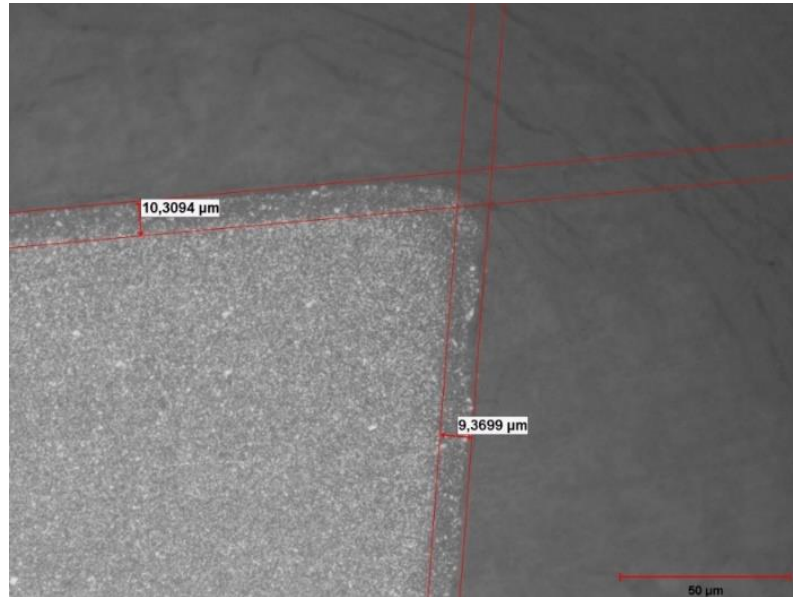
5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1 Yapısal Karakterizasyon Sonuçları

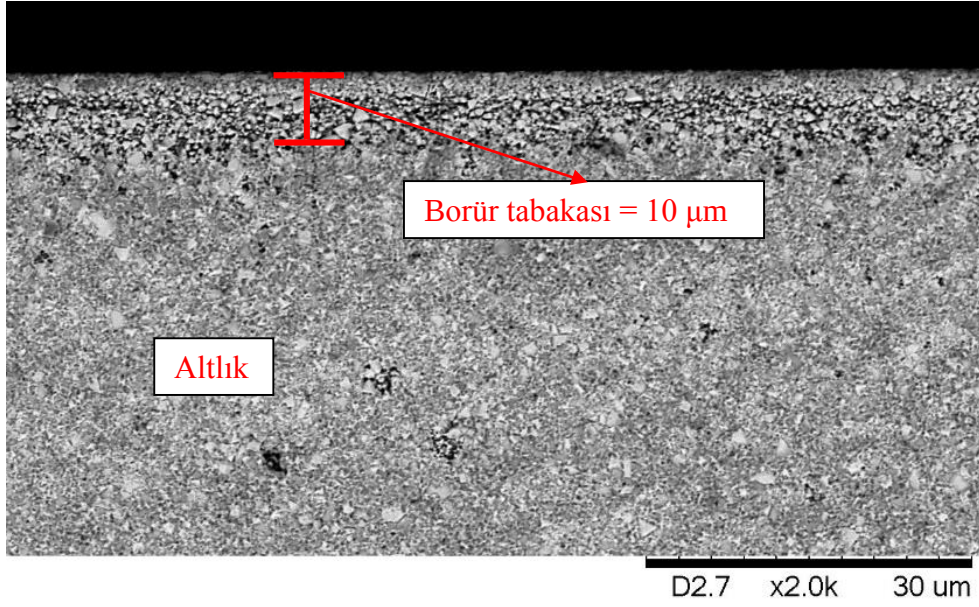
Bu bölümde borlanmış kesici takımların borür tabaka kalınlıklarının sıcaklık ve zamana bağlı değişimi, XRD analizi sonucu oluşan fazlar ve ayrıntılı SEM/EDX analizi sonuçları verilmiştir.

5.1.1 Borür tabaka kalınlıkları

Bölüm 4.3.1’de borür tabaka kalınlıklarının önce optik mikroskop, sonra ise numune hazırlamadaki zorluklar nedeniyle SEM’de ölçüldüğü belirtilmiştir. Optik mikroskop ve SEM ile ölçülen büyüklüklerin birbiriyle tutarlı olduğunu göstermek için örnek olarak 900 °C sıcaklık ve 4 saat süre ile borlanmış kesici takımın uzun uğraşlar sonunda kenar yuvarlanmasız parlatılmış halinin 500x büyütmede optik mikroskoptaki mikroyapı görüntüsü Şekil 5.1’de, yine aynı numunenin 2000x büyütmede SEM’deki görüntüsü ise Şekil 5.2’de verilmiştir. Burada, her iki yöntemde de ölçülen tabaka kalınlığı 10 µm’dir. Bu nedenle borür tabaka kalınlıklarının belirlenmesinde SEM mikroyapı görüntülerinden faydalanılmıştır.

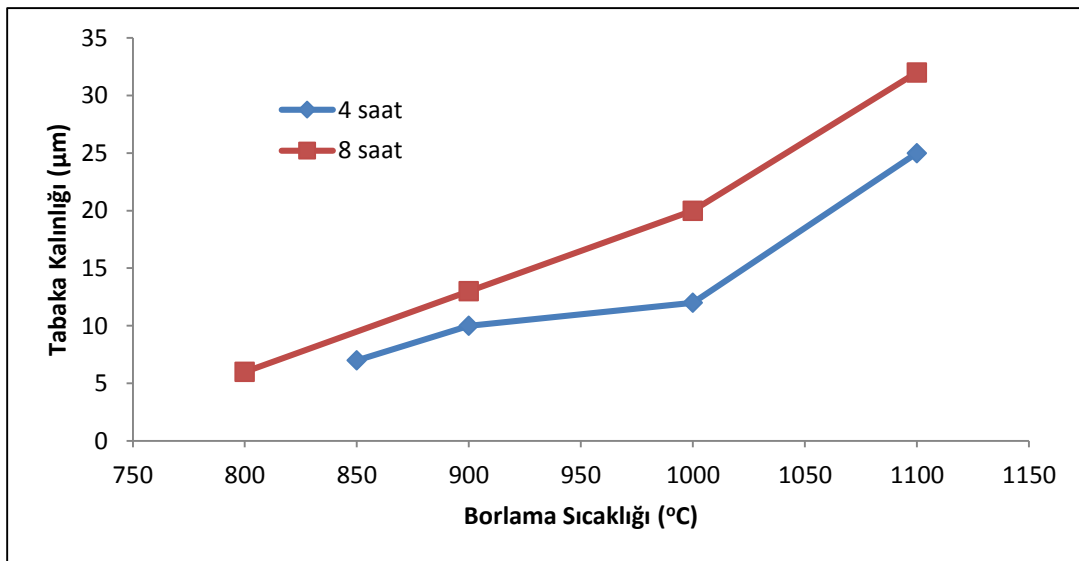


Şekil 5.1 : 900 °C sıcaklıkta ve 4 saat süre borlanmış kesici takımın optik mikroskopta 500x büyütmede borür tabaka kalınlığı.



Şekil 5.2 : 900 °C sıcaklıkta ve 4 saat süre borlanmış kesici takımın 2000x büyütmede SEM görüntüsü.

SEM görüntülerinden yola çıkılarak bulunan borür tabaka kalınlıklarının artan süreye ve sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 5.3’de verilmiştir. Grafik incelenirse, süre sabit tutulduğunda sıcaklık arttıkça borür tabaka kalınlığının da lineer olarak arttığı görülmektedir. Sıcaklıklar sabit tutulduğunda ise süre arttıkça borür tabaka kalınlığı da artmaktadır. Burada sıcaklık arttıkça borun difüzyon katsayısı da artmış ve bor atomu yüksek sıcaklıklarda daha derinlere nüfuz edebilmiştir. Difüzyon hızı aynı zamanda zamana bağlı olduğundan süre arttıkça borun altlığa difüzyonu da daha fazla olmuş ve tabaka kalınlığı bu şekilde artış göstermiştir.

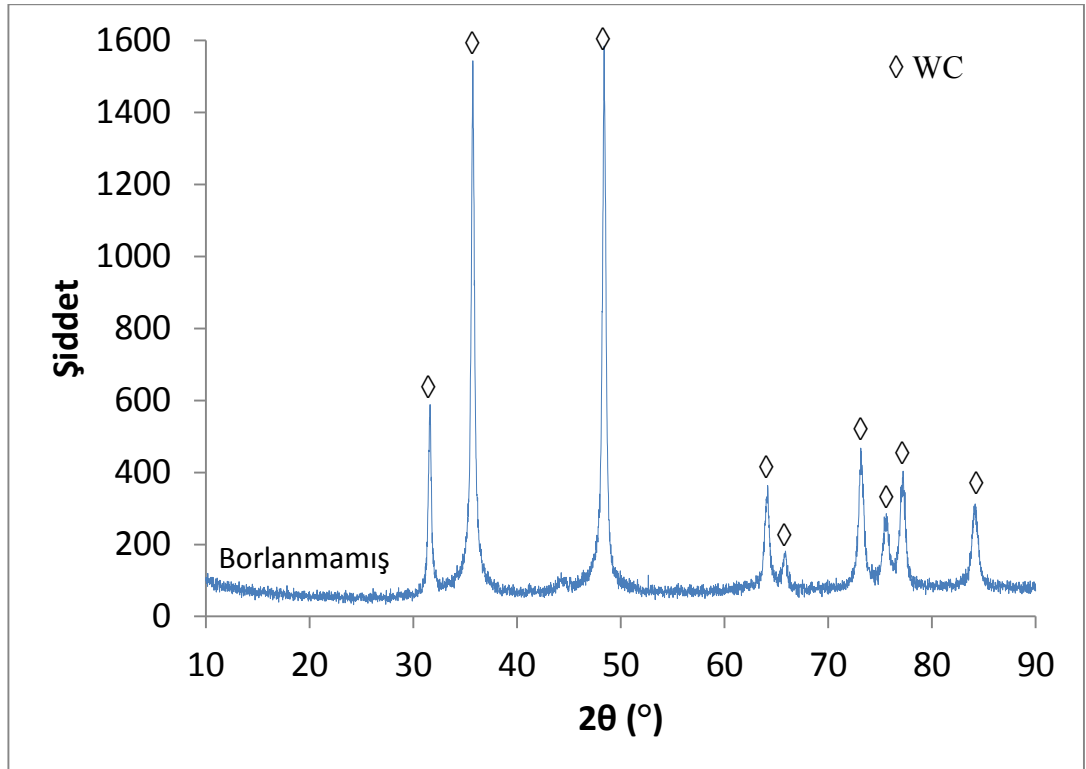


Şekil 5.3 : Borür tabaka kalınlığının sıcaklık ve süreye bağlı değişimi.

En düşük borür tabaka kalınlığı 800 °C sıcaklıkta ve 8 saat süre ile borlanmış kesici takımında 6 µm olarak ölçülmüştür. Bunun nedeni difüzyon hızının sıcaklığa bağlı olarak çok fazla düşmesidir. 850 °C sıcaklıkta borlanan numunenin borlama süresi 4 saat olmasına rağmen 7 µm’luk bir borür tabakası elde edilmiştir ve burada bor difüzyonu süreden daha çok sıcaklığa bağlı olduğu anlaşılmıştır. En yüksek borür tabaka kalınlığı ise 1100 °C sıcaklıkta ve 8 saat süre ile borlanmış numunede 32 µm olarak ölçülmüştür. Burada sıcaklık ve sürenin yüksek olması borun difüzyon hızını önemli ölçüde artırmıştır. Sıcaklığa bağlı tabaka kalınlıklarının tablosu ve tabaka kalınlıklarının ölçüldüğü diğer numunelerin SEM görüntüleri Ek A’da verilmiştir.

5.1.2 XRD faz analizi sonuçları

XRD çalışmalarında borlanmamış ve farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış kesici takımların XRD çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda Cu-K α radyasyonu kullanılmıştır. Şekil 5.4’de verilen diyagramda borlanmamış takım için sadece WC fazı bulunduğu belirlenmiştir.

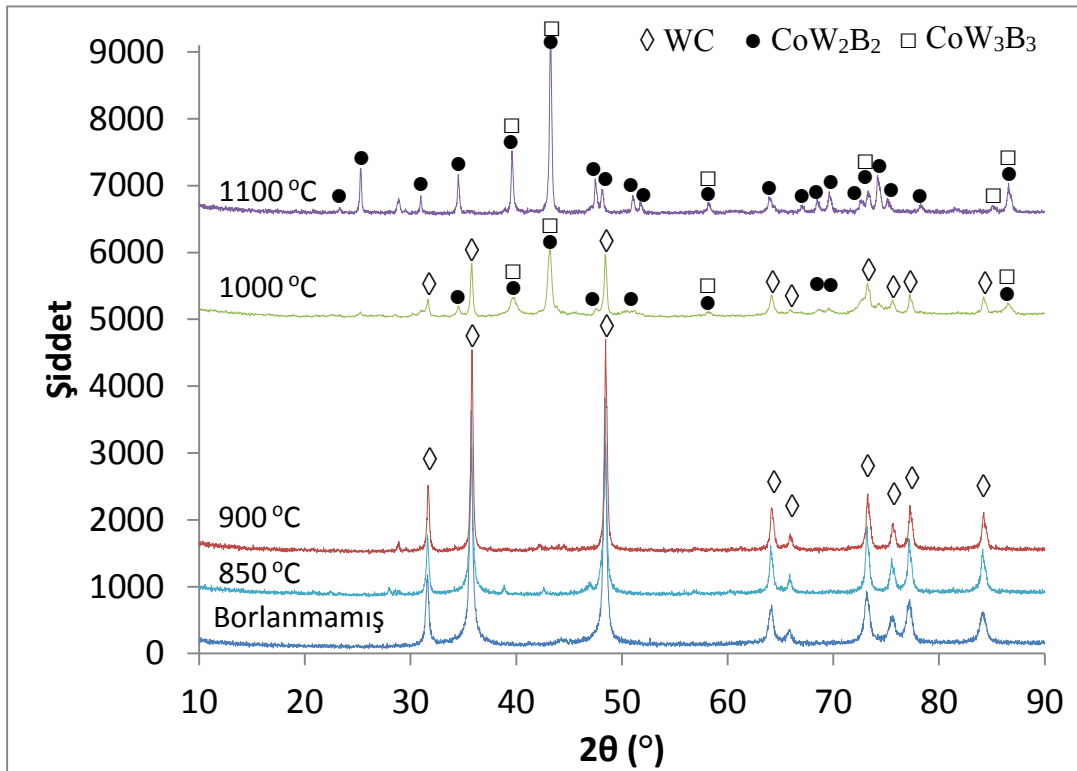


Şekil 5.4 : Borlanmamış kesici takıma ait XRD diyagramı.

Borlanmamış WC-Co kesici takım için XRD piklerinin tamamının WC fazından oluştuğu anlaşılmaktadır. Co fazı % 6 civarında olduğundan herhangi bir belirgin Co pikine rastlanmamıştır. Bu durum WC piklerinin şiddetinin Co pikleri şiddetlerini

baskılamasından dolayı ve yapıdaki Co fazının düşük miktarda olmasından dolayı meydana gelmiştir. Literatür çalışmalarında da WC-Co için Co fazı pikinin bulunmadığı XRD diyagramı elde eden araştırmacılar mevcuttur [35].

Borlanmamış ve 850 °C, 900 °C, 1000 °C, 1100 °C sıcaklıklarda 4 saat süreyle borlanmış WC-Co kesici takımlara ait XRD diyagramı Şekil 5.5’de toplu olarak verilmiştir. Borlanmamış, 850 °C 4 saat ve 900 °C 4 saat borlanmış takımların XRD paterni birbirine benzemekte ve WC fazı dışında farklı faz bulunmamaktadır. Fakat daha yüksek borlama sıcaklığında (1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda) borlanmış numunelerde WC fazının yanında CoW_2B_2 ve CoW_3B_3 gibi fazlarında olduğu tespit edilmiştir.

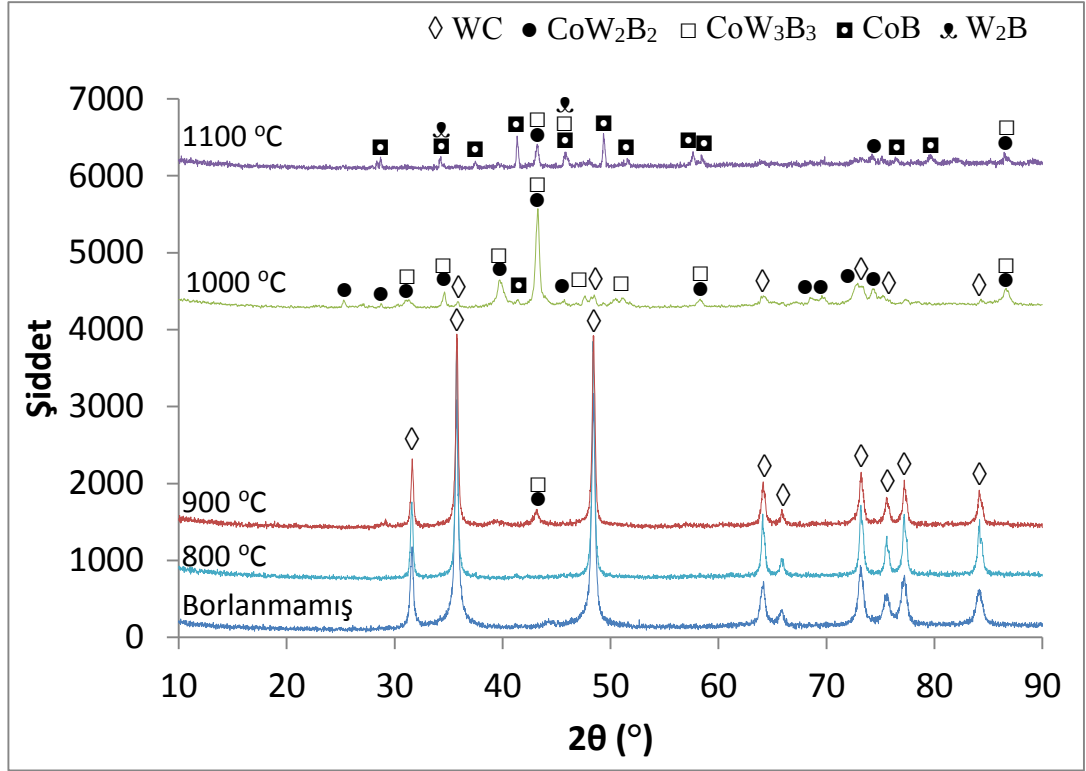


Şekil 5.5 : Borlanmamış ve farklı sıcaklıklarda 4 saat süreyle borlanmış WC-Co kesici takımlara ait XRD diyagramı.

Burada Co matris fazının ergime sıcaklığı, WC’ün ergime sıcaklığından düşük olduğundan dolayı bor atomunun matris fazı ile reaksiyona girdiği anlaşılmaktadır. Bölüm 2.1.6.2’de 1000 °C sıcaklıkta Co içerisinde % 2’ye kadar WC fazının çözündüğü belirtilmişti. Buradaki bilgiler ışığında W’in de matris içerisinde olabileceği ve W-Co-B üçlü bileşiğini oluşturabileceği beklenen bir durumdur. Diğer yandan sıcaklık arttıkça WC piklerinin şiddetlerinin azaldığı, buna karşılık CoW_2B_2

ve CoW_3B_3 fazlarının şiddetlerinin de arttığı görülmektedir. Burada artan sıcaklıkla bor difüzyonu hızlanmış ve oluşan üçlü bileşiğin miktarı artarak XRD tarafından kolaylıkla saptanabilir hale gelmiştir.

Borlanmamış ve 800 °C, 900 °C, 1000 °C, 1100 °C sıcaklıklarda 8 saat süreyle borlanmış WC-Co kesici takımlara ait XRD diyagramı Şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.6 : Borlanmamış ve farklı sıcaklıklarda 8 saat süreyle borlanmış WC-Co kesici takımlara ait XRD diyagramı.

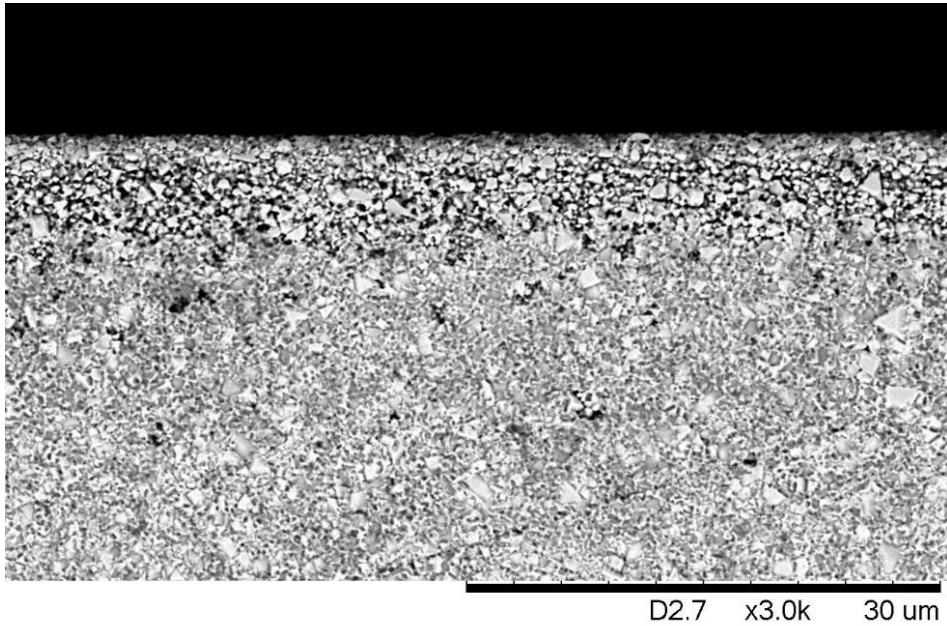
Şekil 5.6’daki diyagram incelendiğinde 1100 °C sıcaklığa kadar oluşan fazlar 4 saat borlanmış numunelere benzerdir. Fakat 900 °C 8 saat borlanmış takımında ise çok küçük de olsa bir CoW_2B_2 ve CoW_3B_3 fazlarından oluşan pike rastlanmıştır. 1000 °C 8 saat borlanmış takımında WC dışında CoW_2B_2 ve CoW_3B_3 fazına, çok az miktarda ise CoB fazına rastlanmıştır. 1100 °C 8 saat borlanmış numunelerin piklerinde ise üçlü borür bileşiklerine ilave olarak CoB fazıda saptanmıştır. Burada artan sıcaklıkla artan borür aktivitesi ile matris fazındaki tüm Co, B ile bileşik oluşturmuştur. Dikkat edilirse stokiyometrik açıdan CoW_2B_2 ve CoW_3B_3 fazlarındaki Co miktarı CoB fazına göre daha azdır. Dolayısıyla yapıdaki Co’nın tamamına yakını artık bor ile Co’ca daha zengin olan CoB bileşiğini oluşturmuştur. Bu oluşumda şüphesiz ki süre çok önemlidir. Çünkü 1100 °C 4 saat borlanmış takımında CoB fazı mevcut olmasına rağmen

süre kısıtlı olduğu için yeterince CoB fazı oluşmamış ve buna bağlı olarak da XRD’de bu faz saptanamamıştır. Çalışmalarda elde edilen fazların literatürde yapılan çalışmalar ile [8, 34, 35, 38, 39] uyumlu olduğu görülmüştür.

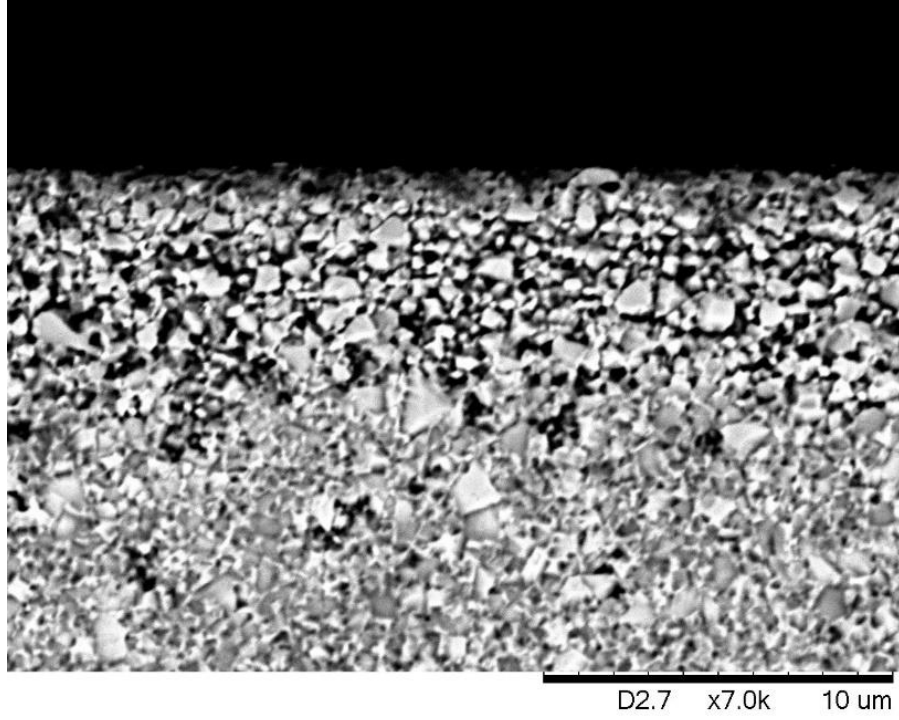
5.1.3 SEM çalışmaları ve EDX analizi sonuçları

Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış kesici takımlardaki borür tabakalarının detaylı incelemeleri için EDX ve SEM çalışmaları yapılmış ve Şekil 5.7 ile Şekil 5.8’de 900 °C 4 saat süre ile borlanmış kesici takımın yüksek büyütme mikroyapıları verilmiştir. Altlıkta yer alan parlak beyaz ve köşeli yapıdaki taneler WC fazını, açık gri taneler ise Co fazını göstermektedir. Borür tabakasında yer alan beyaz renkli ve köşeli taneler ise yine WC fazını, siyah bölgeler ise Co matris ile bileşik oluşturan borür fazlarını göstermektedir.

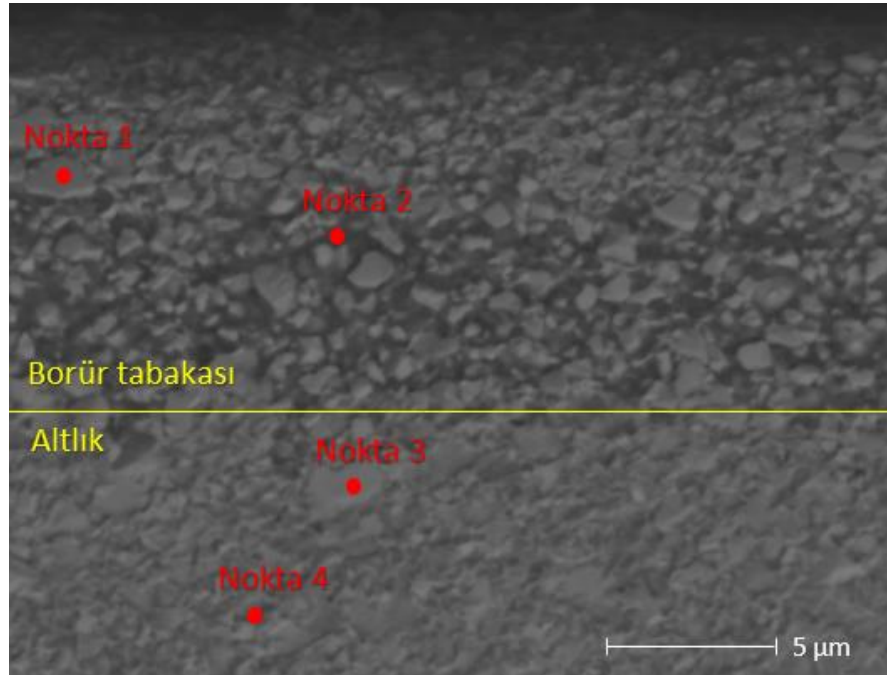
Şekil 5.8’de borür tabakasında beyaz WC tanelerinin etrafındaki siyah bölgeler daha net olarak görülebilmektedir. Burada siyah bölgenin borun nüfuz ettiği ve bir bileşik oluşturduğu bölge olmasından emin olmak için elemental nokta EDX analizleri yapılmış ve bunun için altlık ve borür tabakasındaki 4 farklı noktadan data alınmıştır. Nokta analizlerinde yapı içerisindeki W, C, Co ve B atomunun ağırlık ve atomik yüzdeleri belirlenmiştir. Örnek olarak 900 °C sıcaklıkta ve 8 saat süre ile borlanmış kesici takımın EDX analizinde alınan noktalar Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.7 : 900 °C sıcaklıkta ve 4 saat süre borlanmış kesici takımın 3000x büyütmede SEM görüntüsü.



Şekil 5.8 : 900 °C sıcaklıkta ve 4 saat süre borlanmış kesici takımın 7000x büyütmede SEM görüntüsü.



Şekil 5.9 : 900 °C - 8 saat borlanmış takımda elemental nokta analizi alınan noktalar.

Şekil 5.9'daki borür tabakasında 4 farklı renk kontrastı olduğu anlaşılmaktadır. Bu mikroyapıdaki renklerin kontrastının Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'deki mikroyapılardan farklı olmasının nedeni farklı SEM cihazlarında çekilmiş olmalarından dolayı meydana gelmiştir. Buna göre Şekil 5.9'da farklı renk veren fazlardaki element

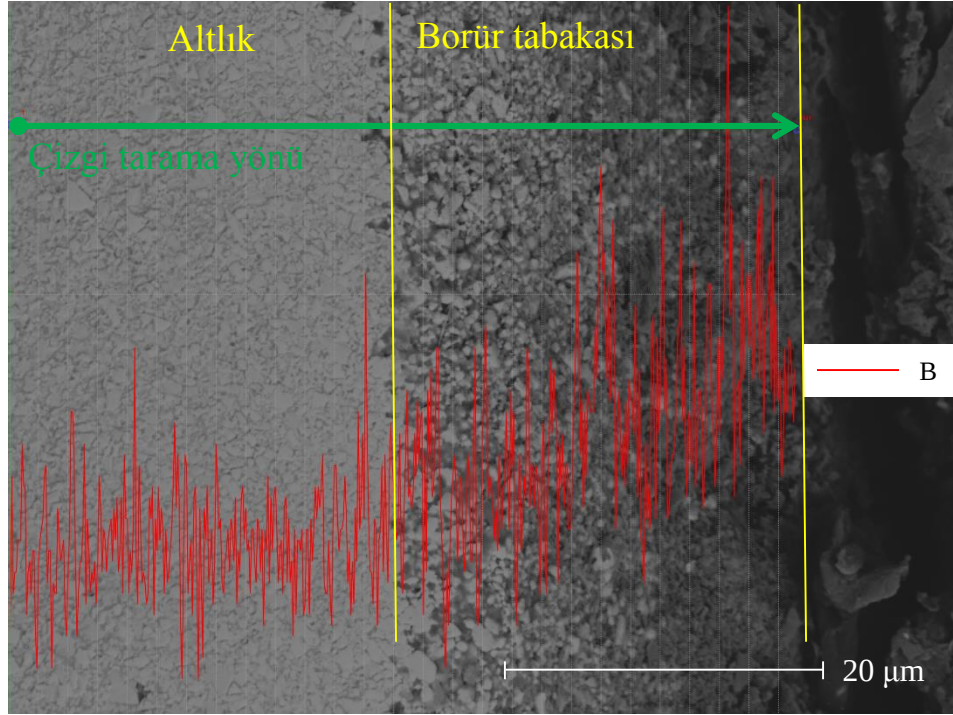
oranları; borür tabakası için açık gri (Nokta 1) ve siyah bölgeden (Nokta 2), altlık için ise açık gri (Nokta 3) ve koyu gri (Nokta 4) bölgeden tarama yapılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Buna göre tarama yapılan noktalarda bulunan W, Co, C ve B ağırlık (% W) ve atomik (% A) yüzdeleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde altlık ve borür tabakasındaki açık gri bölgelerde (nokta 1 ve nokta 3) W’in ağırlıkça fazla olduğu görülmektedir. Bu fazın WC olduğu anlaşılmıştır. Altlıktaki koyu gri bölgede (nokta 4) Co atomunun ağırlık yüzdesinin arttığı görülmekte burasında Co matris olduğu belirlenmiştir. Borür bileşiğinin olduğu bölge olarak tahmin edilen siyah bölgede ise (nokta 2) B ve C atomunun ağırlık ve atomik yüzdelerinin arttığı görülmektedir. Buradaki sonuç ise B atomunun WC tanelerinin arasındaki kobaltca zengin bölgelere (matris) difüze ettiğini göstermiştir. B atomunun hafif element olması, C’a oldukça yakın pik vermesi ve piklerin girişim yapması nedeniyle EDX nokta analizlerinde borür tabakasındaki siyah bölgelerin (C ve B atomlarının toplam elemental yüzdelerinin fazla olduğu bölgeler) bor atomunun difüzyon yaptığı bölgeler olarak düşünülmesi gerektiği daha sağlıklı bulunmuştur.

Çizelge 5.1 : 900 °C - 8 saat borlanmış takımda elemental nokta analiz sonuçları.

	Nokta 1		Nokta 2		Nokta 3		Nokta 4	
Elements	% W	% A	% W	% A	% W	% A	% W	% A
W	86.06	29.58	62.38	10.81	86.3	30.35	64.21	18.18
Co	1.04	1.11	5.49	2.97	1.28	1.4	21.59	19.07
B	2.43	14.2	3.33	9.82	2.28	13.62	2.41	11.62
C	10.48	55.12	28.8	76.41	10.15	54.63	11.79	51.13

Borlanmış numunelerde nokta analizlerine ilave olarak borür tabakasındaki bor konsantrasyonunun değişimini incelemek için altlıktan başlanarak borür tabakası boyunca EDX ile elemental çizgi analizi yapılmış ve örnek olarak 1000 °C – 8 saat borlanmış numune için sonuçlar Şekil 5.10’da gösterilmiştir. Çizgi tarama sonuçları bor atomunun altlıktan itibaren en dış yüzeye doğru kademeli olarak arttığını göstermiştir. Şekil 5.10 dikkatlice incelendiğinde dış yüzeyden altlığa doğru 3 farklı bölge olduğu anlaşılmıştır. Bunlar dış yüzeyden itibaren yaklaşık 10 µm’luk bir tabakada B konsantrasyonun yüksek olduğu bölge, 10 µm - 20 µm arasında (altlığa kadar olan bölge) B konsantrasyonun nispeten az olduğu difüzyon tabakası ve B konsantrasyonun çok az olduğu (ya da olmadığı) altlık bölgesidir. Literatürde de difüzyon proseslerinde genellikle difüzyon yapan elementin dış yüzeyde zengin olduğu ve iç yüzeylerde daha az yoğun olduğu tabakalı yapılar elde edilmiştir [38, 40].

Burada B atomu ilk olarak yüzeye difüze olmuş ve difüzyon esnasında altlık ile meydana gelen fazların geçirgenlik miktarlarına bağlı olarak B atomunun içerilere doğru ilerlemesi yavaşlamıştır. Burada borlanan kesici takımların en dış yüzeyinde borca zengin CoB gibi fazların, borür tabakasının altlığına yakın bölgelerinde ise borca daha fakir olan CoW_2B_2 ve CoW_3B_3 gibi üçlü borür bileşiklerinin bulunduğu sonucu çıkarılmıştır. Bu çıkarım literatür çalışmaları ile de uyumludur [38, 41]. Ek B’de verilen diğer analiz sonuçları da benzer bir trend göstermektedir.



Şekil 5.10 : 1000 °C - 8 saat borlanmış takımda elemental çizgi analizi sonuçları.

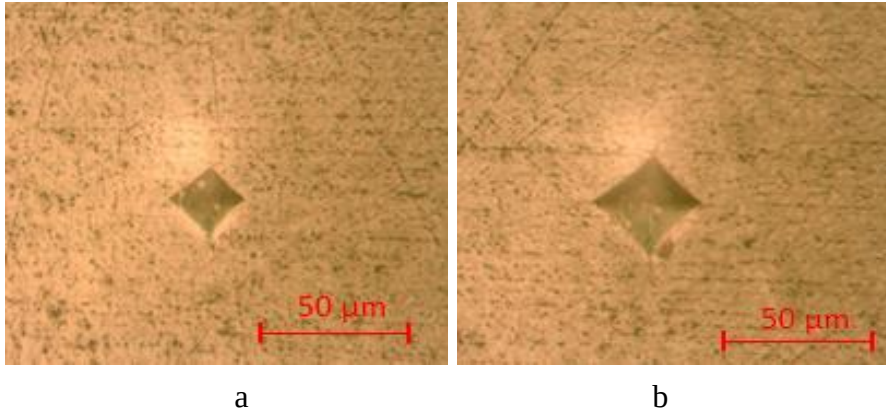
5.2 Mekanik Karakterizasyon Sonuçları

Bu bölümde borlanmış kesici takımlardaki borür tabakası sertliklerinin ve yapışma kabiliyetlerinin sıcaklık ve zamana bağlı değişim sonuçları verilmiştir.

5.2.1 Sertlik sonuçları

Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış kesici takımların sertlik değerleri 1 ve 2 kg yükler için tablo halinde ayrıntılı şekilde Ek C’de verilmiştir. Burada 1 kg yükte sertlik izleri görülmüş fakat sertlik değerlerindeki varyansın fazla olması nedeniyle 2 kg yük altında da sertlik ölçme ve karşılaştırma yapma gereği duyulmuştur. Takımlar parlatılmamasına rağmen yükün oluşturduğu iz görülebilmıştır ve örnek olarak 900

°C’de 4 saat süreyle borlanmış takımın 1 kg ve 2 kg yük altındaki iz görüntüleri Şekil 5.11’de verilmiştir.



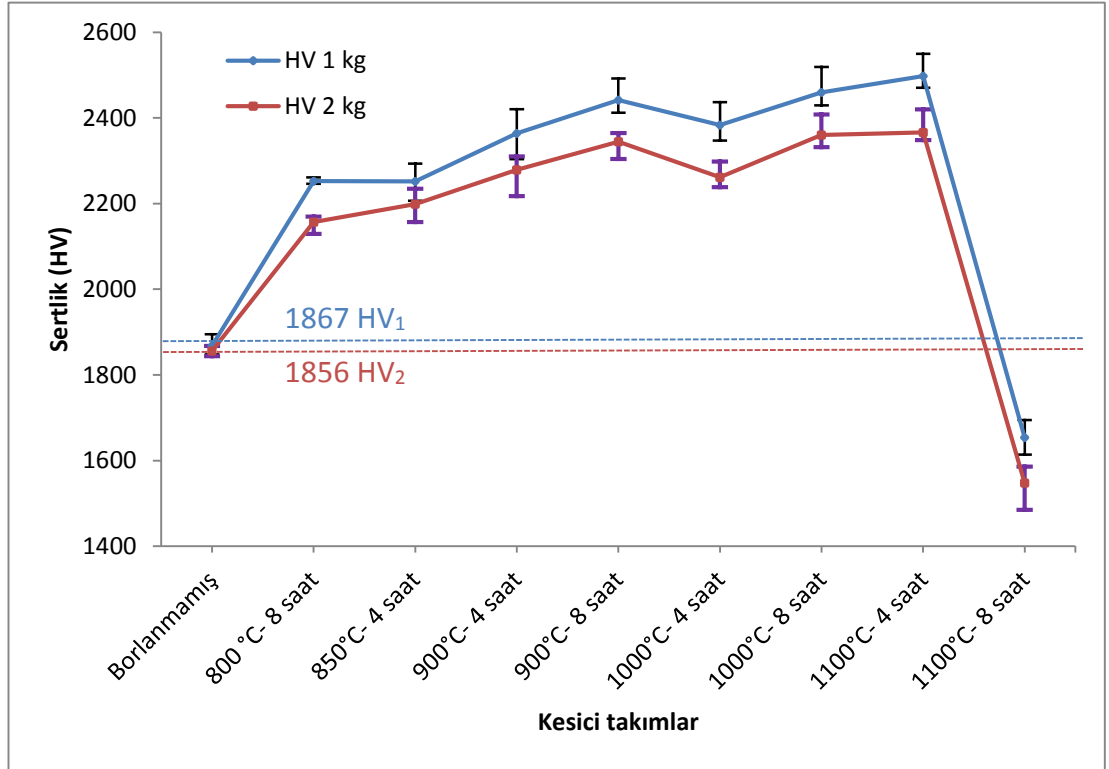
Şekil 5.11 : 900 °C sıcaklıkta ve 4 saat süre borlanmış kesici takımın Vickers sertlik izi a) 1 kg yük altında b) 2 kg yük altında.

Sıcaklık ve süreye bağlı olarak takımlarda meydana gelen sertlik değişimi ise Şekil 5.12’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde borlanmamış takımın 1 ve 2 kg yükte sırasıyla ortalama sertlik değerlerinin 1867 ve 1856 HV olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuç % 6 Co içeren karbür takımların literatürdeki sertlik değerleri ile uyum göstermektedir. 1100 °C’de 8 saat süreyle borlanmış takım haricinde, en düşük sertlik 800 °C’de 8 saat süreyle borlanmış takımda 2 kg yük altında 2157 HV olarak, en yüksek sertlik ise 1100 °C’de 4 saat süreyle borlanmış takımda 1 kg yük altında 2498 HV olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre; borlama neticesinde 1100 °C’de 8 saat süreyle borlanmış takımın dışında ortalama sertlik değeri yaklaşık 511 ile 630 HV arasında artmıştır. Bu takımlardaki borür tabakasının sert olmasının nedeni Bölüm 5.1.2’deki XRD analiz sonuçlarında bulunan CoW_2B_2 ve CoW_3B_3 gibi sert borür bileşikleridir. Bu fazlar orthorombik kristal yapıda (gevrek) ve sertliği saf Co matrisin sertliğinden fazla olduğu için (20-45 GPa) borlanan WC-Co takımlarında böylece yüzey sertlikleri artmıştır [41, 42].

Şekil 5.12’deki grafik incelendiğinde sertlik değerlerinin 4 saat borlanmış kesici takımlarda artan sıcaklıkla arttığı görülmüştür. Bunun nedeni ise Bölüm 5.1.1’de bulunan tabaka kalınlıklarının ve Bölüm 5.1.2’de bulunan sert borür fazlarının miktarının artmasından (XRD paternlerindeki şiddetlerinin miktarının artmasından anlaşılmıştır) kanaklandığı düşünülmüştür. 8 saat borlanan kesici takımlarda ise artan sıcaklıkla sertliğin 1000 °C’ye kadar arttığı anlaşılmıştır. Bunun da yine artan borür tabaka kalınlığı nedeniyle olduğu açıktır. 1100 °C’de 8 saat süreyle borlanmış

takımdaki borür tabaka kalınlığının en yüksek olmasına rağmen sertliğin düşük çıkmasının sebebi ise WC-Co numunedeki Co matris fazının çoğunun bor ile reaksiyona girerek tükenmesi ve XRD analizlerinde nispeten düşük sertliğe sahip CoB fazının (11 GPa) ortaya çıkması olarak düşünülmüştür [42].

Ölçümlerde sertlik değerleri olarak 1 kg yük için 2 kg yüke göre daha yüksek çıkmıştır bu da genel olarak sertlik ölçümlerinde artan yüklerle sertliğin azalması nedeniyle beklenen bir durumdur.



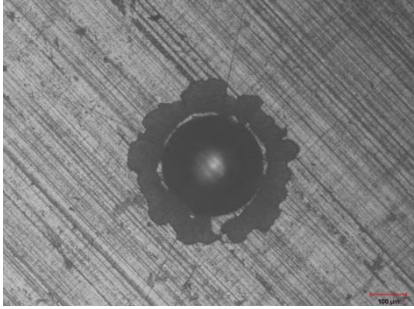
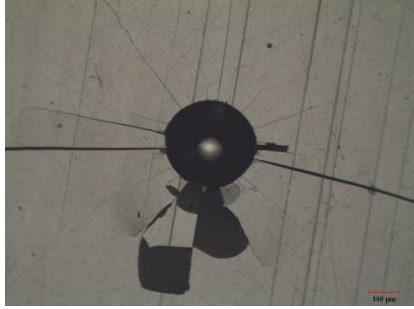
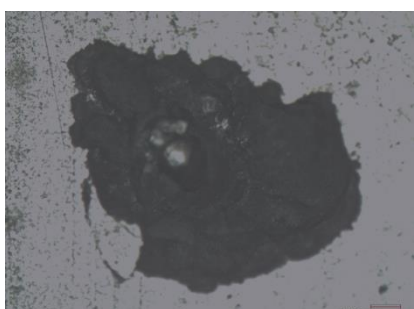
Şekil 5.12 : Sertlik değerlerinin sıcaklık ve süreye bağlı olarak değişimi.

5.2.2 Yapışma testi sonuçları

5.2.2.1 Rockwell C (150 kg) yükteki sonuçlar

Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış kesici takımların 150 kg yük altında yapılan yapışma testi sonuçları Şekil 5.13’de verilmiştir. Şekil 5.13 incelendiğinde hemen hemen tüm numunelerde mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. Bunun yanında indentasyon izinin etrafında pul pul dökülmeler meydana gelmiştir. Bu dökülme alanları borlama sıcaklığı arttıkça genişleme eğilimi göstermiştir. En az dökülme 800 °C sıcaklıkta 8 saat süre ile borlanmış numunede en fazla dökülme ise 1100 °C sıcaklıkta 4 saat borlanmış numunede gözlenmiştir. Bunun nedeninin artan sıcaklıkla bölüm 5.1.2’de

elde edilen borür fazlarının miktarının ve dolayısı ile tabaka kalınlığının artmasından dolayı olduğu açıkça görülmektedir. 1100 °C 8 saat borlanmış numunedeki ize bakıldığında bağlayıcı Co fazının büyük bir kısmının borür bileşiği oluşturması nedeniyle pul pul dökülme olmamış, bir kraterleşme meydana gelmiştir.

Borlama Sıcaklığı	4 saat borlanmış takımlar	8 saat borlanmış takımlar
850 °C (4 saat) 800 °C (8 saat)		
900 °C		
1000 °C		
1100 °C		

Şekil 5.13 : Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerin 150 kg yük ile yapışma testi sonuçları.

Daha sağlıklı bir karşılaştırma yapabilmek için Rockwell indentasyonu ile elde edilen hasar görüntüleri Şekil 4.12'deki standart görüntülerle karşılaştırılmıştır. Buna göre 150 kg yük altında 800 °C – 8 saat, 850 °C - 4 saat ve 900 °C - 4 saat borlanmış kesici takımların kabul edilebilir 4 hasar görüntüsünden biri olan HF4 tipi hasara uğradığı anlaşılmaktadır. Bunun dışında diğer tüm indentasyon izlerinin HF5 ve HF6 tipi hasara uğradığı çok açık ve net bir şekilde görülmektedir.

5.2.2.2 Rockwell A (60 kg) yükteki sonuçlar

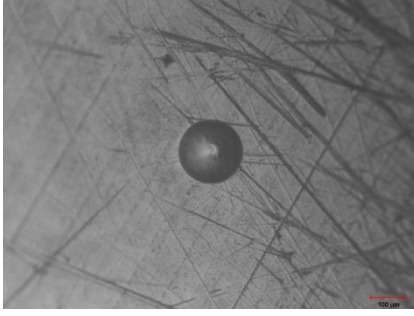
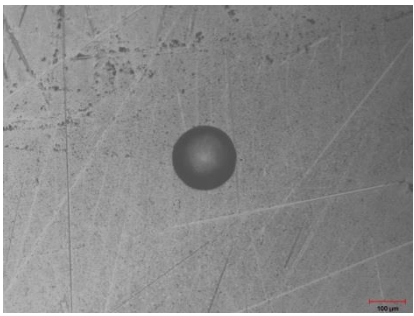
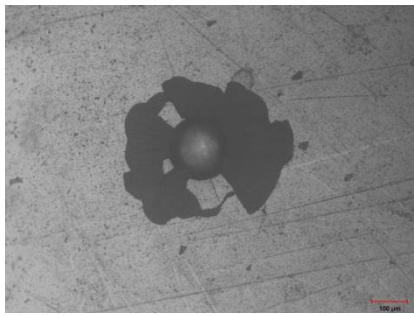
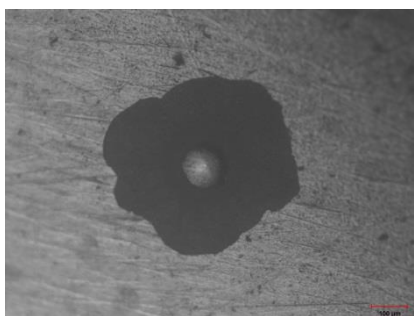
Bu tez çalışmasında borlanan numunelerin sert olması ve elde edilen borür tabakasının da gevrek bir yapıda olması nedeniyle 150 kg yük altında gerçekleştirilen yapışma testlerinde çok fazla mikro çatlak ve dökülme meydana gelmiştir. Literatürde bu çalışmada olduğu gibi sert yapıdaki kaplamaların (elmas kaplama gibi) adhezyon testlerinde daha düşük kuvvetler de (100 veya 60 kg) kullanılmıştır [35, 39]. Bu nedenle daha doğru bir yapışma değerlendirmesi yapmak için testler ayrıca indentasyon yükü 60 kg'a indirilerek tekrar yapılmıştır.

Testler sonucunda elde edilen mikroskop görüntüleri ise Şekil 5.14'de verilmiştir. 60 kg yük altında oluşan izler incelendiğinde 1000 °C - 8 saat, 1100 °C - 4 saat, ve 1100 °C - 8 saat borlanmış numunelerde indentasyon izi etrafında pul pul dökülmeler meydana gelmiştir. Buradan indentasyon yükü azaltılsa dahi 1000 °C - 8 saat, 1100 °C - 4 saat, ve 1100 °C - 8 saat borlanmış numunelerde elde edilen borür tabakasının yapışma kabiliyetinin iyi olmadığı anlaşılmaktadır. Bu numunelerin haricindekilerde ise indentasyon sonucu herhangi bir çatlak ya da dökülme hasarı görülmemiş, borür tabakasının yapışma kabiliyetinin iyi olduğu anlaşılmıştır. Şekil 5.14'deki iz görüntüleri yine Şekil 4.12'deki standart görüntülerle karşılaştırıldığında 1000 °C - 8 saat, 1100 °C – 4 saat, ve 1100 °C - 8 saat borlanmış numunelerin HF6 tipi hasara uğradığı, bunun dışındaki numunelerin ise herhangi bir hasara uğramadığı görülmektedir.

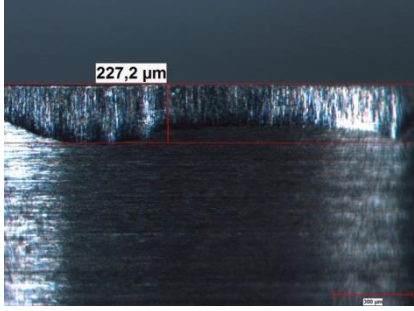
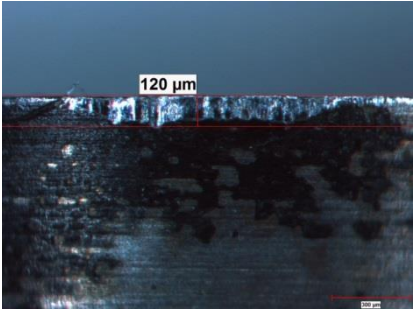
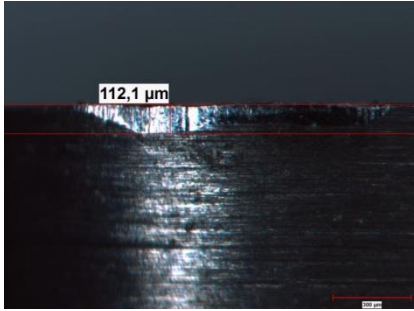
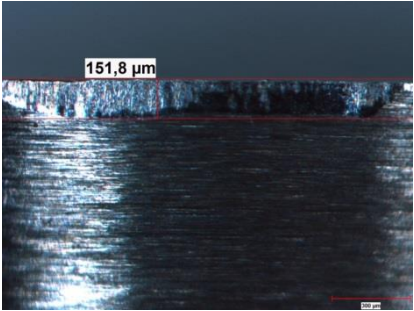
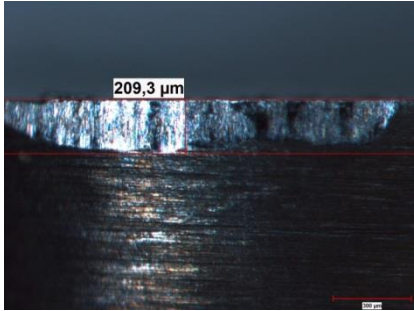
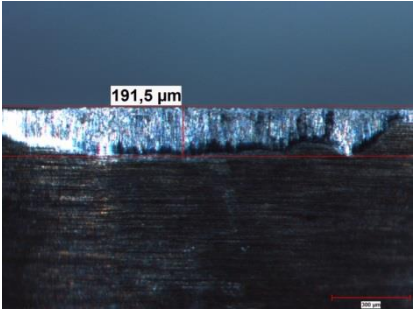
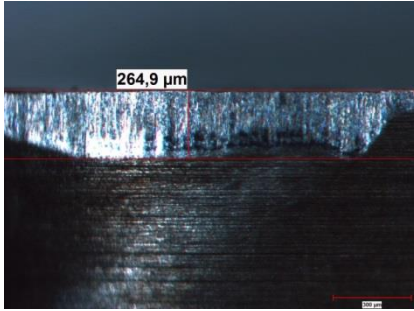
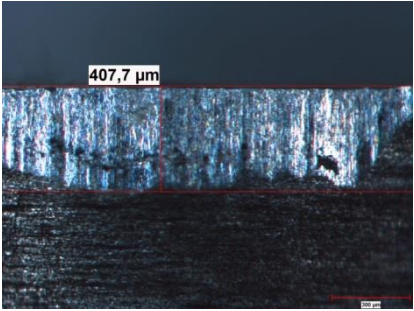
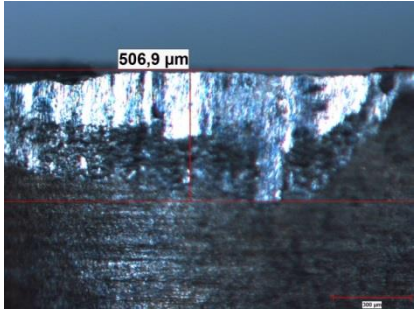
5.3 Aşınma Sonuçları

Bu tez çalışmasında elde edilen tüm kesici takımların Inconel 718 parça üzerindeki saha denemelerinin ardından sadece bir yüzeyinde meydana gelen serbest yüzey aşınmalarının mikroskop görüntüleri Şekil 5.15'de verilmiştir. Aşınmalar

incelendiğinde görüntülerin tipik bir serbest yüzey aşınması görüntüsü olduğu anlaşılmaktadır. Aşınma yüzeylerinde talaşın sürekli olması nedeniyle meydana gelen kazıma izleri görülmüştür. Aşınma yüzeyleri hemen hemen bütün takımlarda parlak bir yüzey olarak gözükmekte, fakat 1100 °C - 8 saat borlanmış takımındaki borür tabakasının yüzeyden koparak ayrıldığı görülmektedir.

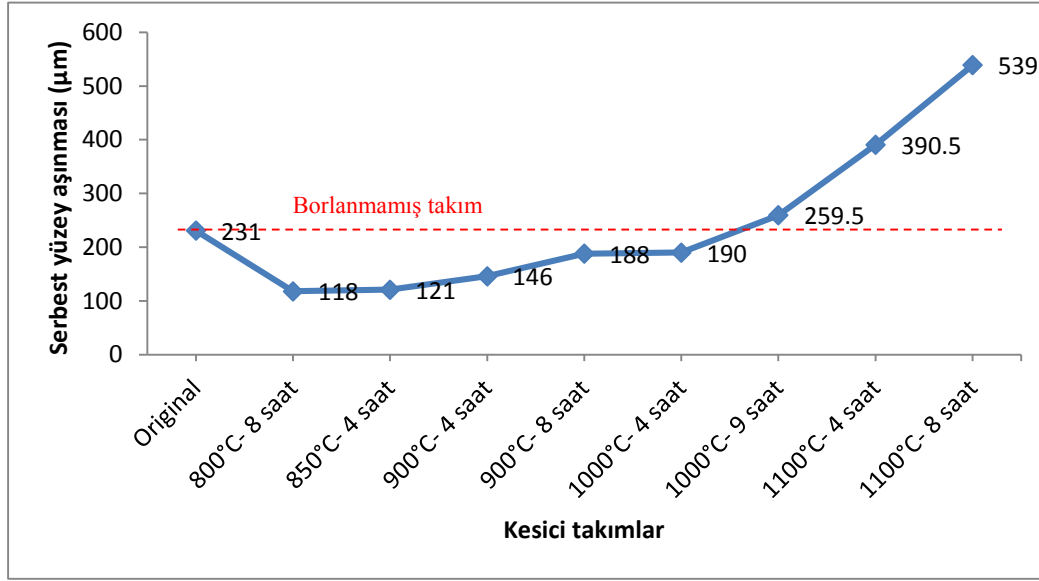
Borlama Sıcaklığı	4 saat borlanmış takımlar	8 saat borlanmış takımlar
850 °C (4 saat) 800 °C (8 saat)		
900 °C		
1000 °C		
1100 °C		

Şekil 5.14 : Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerin 60 kg yük ile yapışma testi sonuçları.

Borlanmamış takım		
Borlama Sıcaklığı	4 saat borlanmış takımlar	8 saat borlanmış takımlar
850 °C (4 saat) 800 °C (8 saat)		
900 °C		
1000 °C		
1100 °C		

Şekil 5.15 : Saha testleri sonucunda kesici takımların aşınma yüzeyleri (1. yüz).

İşte bu görüntü yapışma testlerinde elde edilen indentasyon iz görüntüsüne benzemekte ve bununla yapıdaki Co matrisin tükenmesine bağlı olarak ortaya çıktığı açıkça anlaşılmaktadır. Diğer yüzdeki aşınma değerleri ile aşınma görüntülerini içeren tablolar Ek D’de verilmiştir. Aşınma testlerinde kesici takımın 2 yüzü kullanılmış ve bu iki yüzün aşınma değerlerinin ortalaması alınarak takım aşınma miktarı hesaplanmıştır. Buna göre borlanmış takımların aşınma miktarlarının değişimi Şekil 5.16’da verilmiştir.



Şekil 5.16 : Aşınma testleri sonucu kesici takımlarda meydana gelen aşınma miktarları.

Tüm sonuçlar incelendiğinde borlanmamış kesici takımdaki ortalama aşınma miktarı 231 µm olarak ölçülmüştür. En düşük serbest yüzey aşınması 800 °C - 8 saat ve 850 °C 4 saat borlanmış takımlarda meydana gelmiştir. Fakat 1000 °C - 8, 1100 °C - 4 saat ve 1100 °C - 8 saat borlanmış numunelerdeki aşınma miktarı borlanmamış takıma göre bir hayli artmıştır. 60 kg yük ile yapılan yapışma testi sonuçlarından da söz konusu takımlarda HF6 tipi hasar meydana geldiğinden bu takımlarda aşınma miktarında bir kötüleşme olacağı beklenmiştir. Buradan borlanmış numuneler 60 kg yük altında yapılan Rockwell kaplama yapışma testinin takım performansları hakkında bir ön bilgi verdiği de ispatlanmıştır.

1000 °C - 8, 1100 °C - 4 saat ve 1100 °C - 8 saat borlanmış takımların dışındaki diğer takımlarda aşınma miktarının borlanmamış takımdan daha az olmasının nedeni borür tabakasının daha sert bir yapıya sahip olması ile açıklanabilir. Çünkü Bölüm 5.2.1’de

borür tabaka sertliğinin altığa göre daha fazla olduğu görülmüştür. Sertbest yüzey aşınmasına neden olan en önemli mekanizma Bölüm 2.3’de ayrıntılı bahsedildiği üzere abrazyon mekanizmasıdır. Yine aynı bölümde abrazyonun ve buna bağlı olarak serbest yüzey aşınmasının azaltılabilmesi için daha sert takımların kullanılması gerektiği de vurgulanmıştır.

Fakat sertlik ölçüm sonuçlarında sıcaklık ve süreye bağlı sertliklerde bir artış olmasına rağmen bunun aksine aşınma miktarlarında bir düşüş gözlemlenmesi de şu şekilde açıklanabilir: Numunelerde artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak Bölüm 5.1.1’de de görüldüğü üzere tabaka kalınlıkları da artmaktadır. Rockwell yapışma testlerinden de tabakanın sert ve gevrek bir yapıya sahip olduğu bilindiğinden artan tabaka kalınlığı ve matrisde nispeten yumuşak Co yerine XRD ile belirlenen sert ve gevrek borür bileşiklerinin miktarının artan borlama sıcaklığı ve süresiyle birlikte artması, takımlarda meydana gelen aşınma miktarlarını artırmıştır. Böylece bu sonuçların da yapışma testleri ve sertlik sonuçları ile uyum içinde olduğu anlaşılmıştır. Özetle aşınma sonuçlarına göre borür tabakasının 10 μm ’yi geçmemesi ve borlama işleminin 800-900 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında gerçekleştirilmesi takım performansını artıracığı sonucuna varılmıştır.

6. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu bölümde 5. Bölümde elde edilen sonuçlar ile ilgili değerlendirmelerde bulunulacaktır.

Yapılan tez çalışmasında öncelikle pasta borlama metodu ile % 6 Co içeren WC-Co yuvarlak geometrili sinterlenmiş karbür kesici takımlar farklı sıcaklık ve süreler (800 °C - 8 saat, 850 °C - 4 saat, 900 °C - 4 saat, 900 °C - 8 saat, 1000 °C - 4 saat, 1000 °C - 8 saat, 1100 °C - 4 saat, 1100 °C - 8 saat) altında borlama işlemine tabii tutulmuştur. Borlama işlemi Ar atmosferinde tüp fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra borlanan kesici takımların SEM, EDX, XRD teknikleri ile yapısal karakterizasyonu, sertlik ve borür tabakasının yapışma kabiliyetleri test edilerek mekanik karakterizasyonları yapılmıştır. Son olarak Inconel 718 süper alaşım üzerinde takımlar aşınma testlerine tabi tutulmuştur.

-Metalografik çalışmaların sonucunda en yüksek borür tabaka kalınlığı 1100 °C sıcaklıkta 8 saat süreyle borlanan kesici takımda 32 µm olarak elde edilmiştir. En düşük kalınlık ise 800 °C sıcaklıkta 8 saat süreyle borlanmış takımda 6 µm olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla sıcaklık ve süre arttıkça bor atomunun difüzyon kinetiğinin artması nedeniyle borür tabaka kalınlığı da buna bağlı olarak artmıştır. Fakat sürenin düşük sıcaklıklarda tabaka kalınlığına olan etkisi yüksek sıcaklıklara oranla daha düşüktür. Çünkü 900 °C’de 4 ve 8 saat borlanmış kesici takımlarda tabaka kalınlığı açısından fazla bir fark görülmemiştir. Burada sıcaklığın borun WC-Co malzemeye olan difüzyonunda daha etkili olduğu anlaşılmıştır.

-XRD paternleri farklı sıcaklık ve sürelerle bağlı olarak elde edilen borür tabakalarında CoW_2B_2 , CoW_3B_3 , CoB ve W_2B fazlarının oluştuğunu göstermiştir. Tabaka kalınlıkları ve borlama sıcaklıklarının düşük olduğu 800 °C - 8 saat, 850 °C - 4 saat ve 900 °C - 4 saat borlanmış kesici takımlarda WC dışında borlu bir bileşiğe ait herhangi bir pike rastlanmamıştır. Borlu bileşiklerin yapıda % 6 civarında mevcut olan Co ile az miktarda bileşik oluşturması ve bu bileşiklerin yüzeyde sınırlı kalması, bu fazların yapıda var olmasına rağmen WC piklerinin şiddetli olmasından dolayı paternlerde

görülememiştir. 1100 °C 8 saat borlanmış numunede CoB ve W₂B fazlarının, diğer borlanmış numunelerde ise çoğunlukla CoW₂B₂ ve CoW₃B₃ fazlarının oluştuğu görülmüştür.

-SEM/EDX analizleri incelendiğinde bor atomunun EDX nokta analizleri sonucunda WC tanelerini saran Co matris içerisine difüze ettiği anlaşılmış ve çizgi taramalar neticesinde borür tabakasında altığa oranla bor miktarının kademeli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen borür tabakalarında bor konsantrasyonunun yoğun olduğu bir bölge ve daha az olduğu bir difüzyon bölgesi bulunduğu görülmüştür.

-Vickers sertlik sonuçlarına bakıldığında borür tabakası sertliğinin altığa göre 511 ile 630 HV arasında daha fazla olduğu (1100 °C 8 saat borlanmış kesici takım hariç) görülmüştür. En yüksek sertlik 1 kg yük altında 1100 °C 4 saat borlanmış takımda 2498 HV olarak ölçülmüştür. Sertlikteki artışın XRD ile bulunan CoW₂B₂, CoW₃B₃ gibi sert borür bileşikler sayesinde olduğu anlaşılmıştır. Takım aşınmalarındaki düşüş işte bu sertlik artışı ile açıklanmıştır. Fakat 1100 °C 8 saat borlanmış numunede sertlik düşüşü meydana gelmiş ve 2 kg yük altında 1548 HV sertlik değeri elde edilmiştir. Bunun da WC tanelerinin bulunduğu Co matrisde, Co'nun büyük çoğunluğunun B ve W ile bileşik oluşturması (CoB ve W₂B) ve yapıdaki bağlayıcılık görevini yerine getirememesinden kaynaklandığı anlaşılmıştır. Ayrıca sertlik düşüşünde CoB fazında diğer üçlü fazlara göre daha düşük sertliğe sahip olması (CoW₂B₂ ve CoW₃B₃ = 20-40 GPa, CoB = 11 GPa) etkili olmuştur.

-Elde edilen borür tabakalarının aşınma testlerinde göstereceği performans ve borür tabakasının yapışma kabiliyeti hakkında bilgi alabilmek için 60 ve 150 kg yük altında yapılan Rockwell kaplama yapışma testlerinin sonuçları göstermiştir ki artan borlama sıcaklığı borür tabakasının yapışma kabiliyetini olumsuz yönde etkilemektedir. Nitekim 60 kg yük altında indentasyon izlerinde çatlama ve dökülmeler gözlemlenen 1000 °C - 8 saat, 1100 °C - 4 saat, 1100 °C - 8 saat borlanmış kesici takımlar (Standart skalaya göre HF6 tip hasara uğramışlardır) aşınma testlerinde de borlanmamış takımdan daha fazla miktarda aşınmışlardır.

-Bu çalışmanın özgün yanı; borlanmış kesici takımların pin on disk v.b. laboratuvar ortamlarında aşınma testlerine tabii tutulmadan direkt olarak dikey torna tezgahında Inconel 718 süper alaşım üzerinde denemiş ve serbest yüzey aşınma miktarlarına

bakılmış olmasıdır. Buna göre aşınma miktarı en düşük 800 °C sıcaklıkta 8 saat borlanmış takımda ortalama 118 µm olarak ölçülmüştür. Borlanmamış takımındaki aşınma miktarı ise 231 µm olarak ölçülmüş sonuç olarak borlama neticesinde yaklaşık % 48 civarında takım aşınmasında iyileşme sağlanmıştır. Bu iyileşmenin borür tabakasının sertliğinin fazla olması ve abrazyon aşınmasına gösterdiği dirençten dolayı meydana geldiği anlaşılmıştır.

Tüm bu çalışmaların sonucunda optimum borlama proses parametreleri aşağıdaki gibi tavsiye edilmektedir. Buna göre % 6 Co içeren WC-Co kesici takımlarda;

- 800 - 900 °C sıcaklık ve 2 - 6 saat süre aralığında,
- Borür tabaka kalınlığının 10 µm'yi geçmeyeceği borlama şartları altında borlama yapılması tavsiye edilmektedir.

Bu tez çalışmasında pasta borlama ile WC-Co kesici takımların yüzey özelliklerinin iyileştirilmiş ve süper alaşım malzeme üzerinde başarıyla denenmiştir. Çalışmanın literatüre çok önemli bir katkı sağlaması ümit edilmektedir.

Çalışmanın sonucunda aşağıda belirtilen öneriler yapılmıştır.

-Bundan sonra yapılacak çalışmalarda Co oranı değişik takımlar kullanılmak suretiyle bağlayıcı etkisinin borlanmış kesici takımlar üzerindeki performansı araştırılabilir.

-Bu çalışmada aşınma testleri borlanmamış takım ile karşılaştırılmıştır. Yapılacak yeni çalışmalarda kaplamalı takımlar ile borlanmış takımların karşılaştırılması literatüre yine önemli katkılar yapacaktır.

-Bir diğer öneri olarak ise bu çalışmada kesme kuvvetlerinin ölçümü yapılamadığından borlanmış ve borlanmamış takımlarda kesme kuvvetlerinde meydana gelen değişimler saptanamamıştır. Bu nedenle ileride yapılacak çalışmalarda kesme kuvvetlerinin de ölçülmesi literatüre katkı sağlayacaktır.

EKLER

EK A: Sıcaklık ve süreye bağlı borür tabaka kalınlıkları ve SEM görüntüleri

EK B: Bazı borlanmış kesici takımlara ait EDX sonuçları

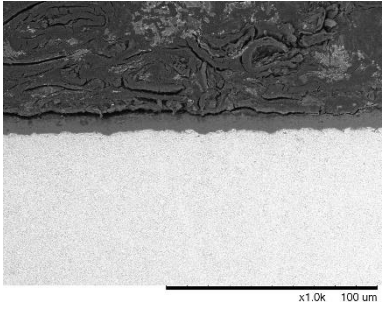
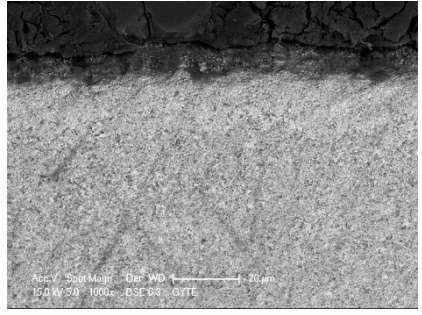
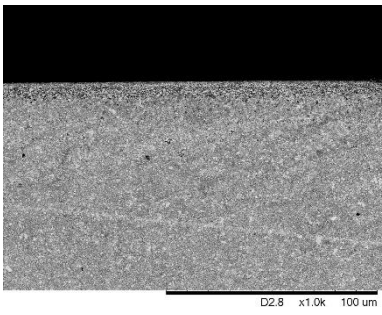
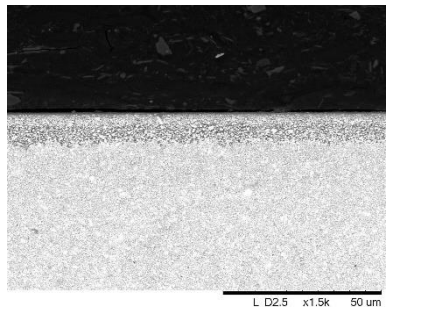
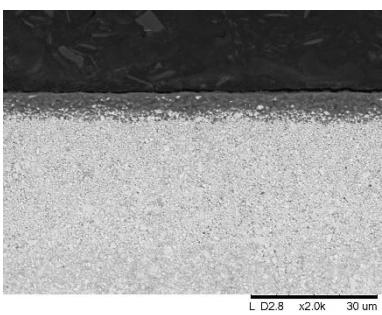
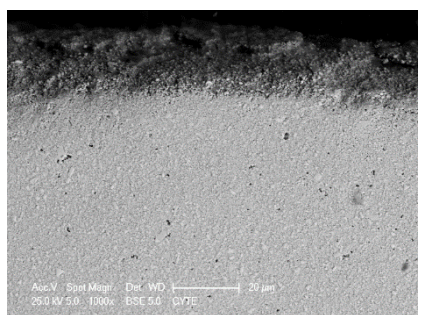
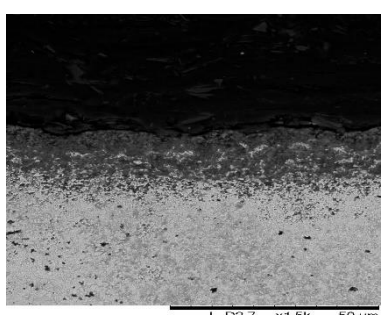
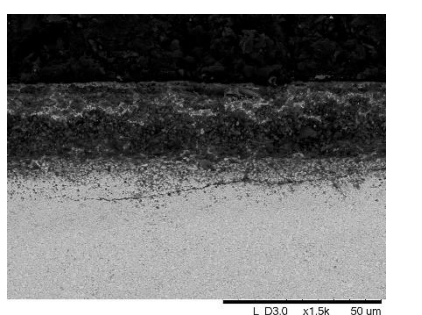
EK C: Borlanmış kesici takımlara ait ayrıntılı sertlik sonuçları

EK D: Kesici takımların aşınma testi sonucu mikroskop görüntüleri

EK A

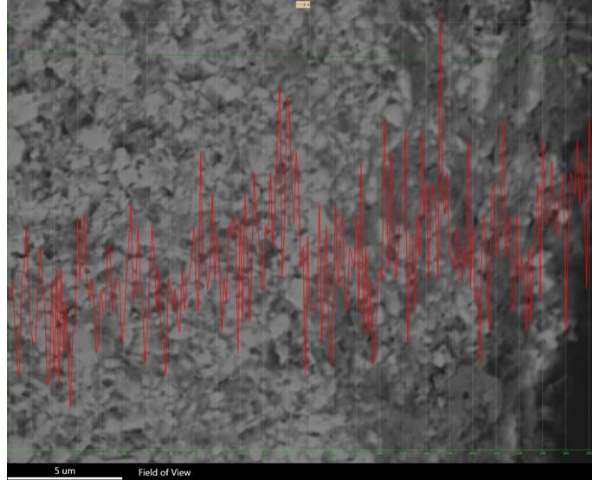
Çizelge A.1: Borür tabaka kalınlıkları.

Parametreler	Tabaka kalınlığı (µm)
800 °C - 8 saat	6
850 °C - 4 saat	7
900 °C - 4 saat	10
900 °C - 8 saat	13
1000 °C - 4 saat	12
1000 °C - 8 saat	20
1100 °C - 4 saat	25
1100 °C - 8 saat	32

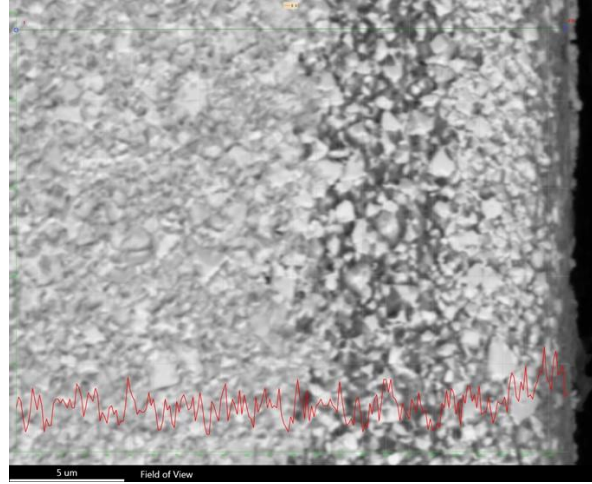
Borlama Sıcaklığı	4 saat borlanmış takımlar	8 saat borlanmış takımlar
850 °C (4 saat) 800 °C (8 saat)		
900 °C		
1000 °C		
1100 °C		

Şekil A.1 : Borlanmış numunelerin SEM görüntüleri.

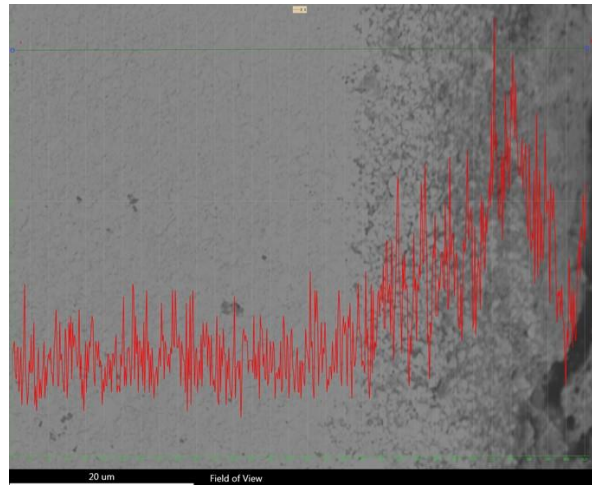
EK B



Şekil B.1 : 800 °C 8 saat borlanmış takımda EDX çizgi analizi.



Şekil B.2 : 900 °C 8 saat borlanmış takımda EDX çizgi analizi.



Şekil B.3 : 1000 °C 8 saat borlanmış takımda EDX çizgi analizi.

EK C

Çizelge C.1 : Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerin Vickers sertlikleri.

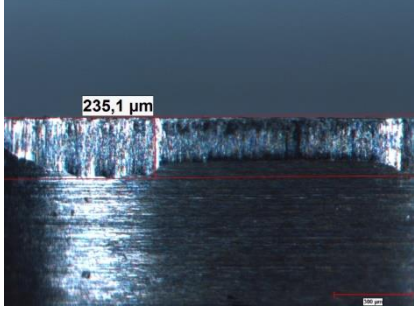
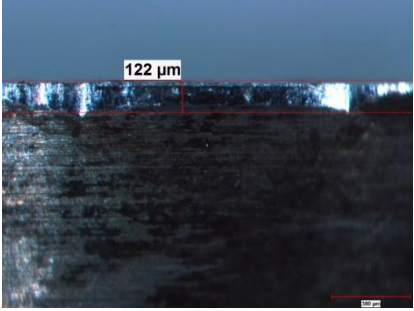
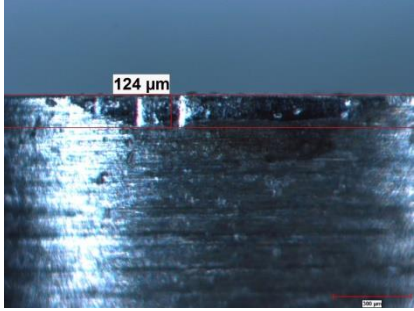
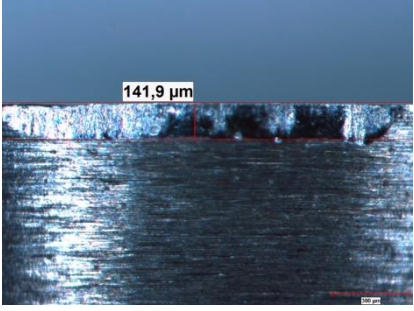
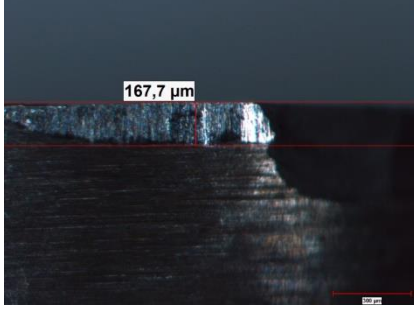
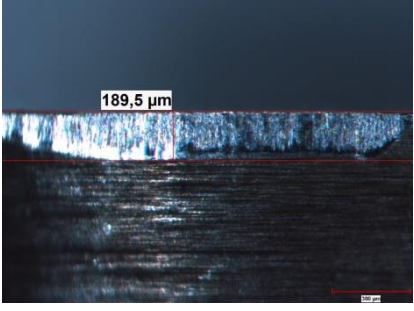
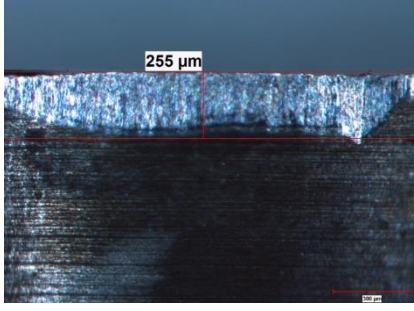
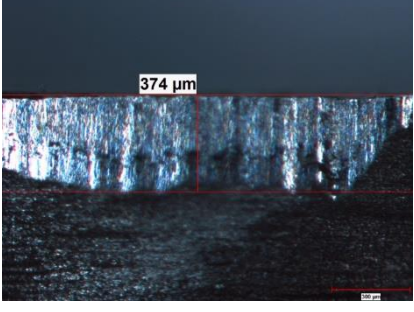
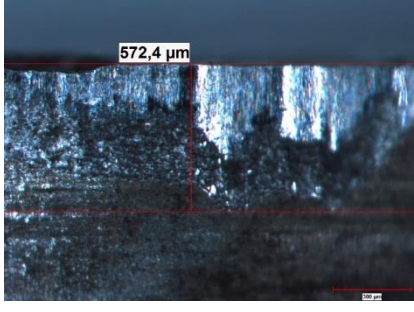
HV 1 kg									
	Borlan- mamış	800C- 8h	850C- 4h	900C- 4h	900C- 8h	1000C- 4h	1000C- 8h	1100C- 4h	1100C- 8h
1	1864	2247	2294	2381	2413	2420	2477	2476	1648
2	1864	2257	2207	2304	2412	2349	2519	2550	1614
3	1895	2246	2243	2420	2454	2437	2429	2471	1662
4	1879	2261	2213	2340	2434	2347	2435	2495	1664
5	1848	2251	2270	2365	2445	2379	2456	2507	1695
6	1854	2256	2287	2374	2492	2370	2440	2488	1643
Min	1848	2246	2207	2304	2412	2347	2429	2471	1614
Max	1895	2261	2294	2420	2492	2437	2519	2550	1695
Ort	1867	2253	2252	2364	2442	2384	2459	2498	1654
Std.	17,17	5,96	37,26	39,18	29,77	37,07	33,95	28,86	26,68
Sap.									
% 95 G.A.	13,745	4,774	29,81	31,35	23,82	29,66	27,17	23,09	21,35

HV 2 kg									
	Borlan- mamış	800C- 8h	850C- 4h	900C- 4h	900C- 8h	1000- 4h	1000- 8h	1100- 4h	1100- 8h
1	1844	2129	2190	2287	2304	2298	2381	2349	1485
2	1850	2150	2157	2288	2321	2269	2408	2348	1560
3	1856	2166	2194	2290	2359	2243	2340	2381	1586
4	1853	2164	2213	2217	2364	2257	2361	2420	1545
5	1868	2170	2206	2280	2354	2238	2332	2349	1530
6	1865	2163	2235	2310	2365	2265	2338	2353	1580
Min	1844	2129	2157	2217	2304	2238	2332	2348	1485
Max	1868	2170	2235	2310	2365	2298	2408	2420	1586
Ort	1856	2157	2199	2279	2344	2262	2360	2367	1548
Std.	9,099	15,28	26,11	31,79	25,63	21,41	29,89	29,16	37,07
Sap.									
% 95 G.A.	7,281	12,23	20,89	25,44	20,51	17,13	23,91	23,33	29,66

EK D

Çizelge D.1 : Kesici takım aşınma miktarları.

		Aşınma miktarları (µm)							
	Borlanmamış	800-8h	850-4h	900-4h	900-8h	1000-4h	1000-8h	1100-4h	1100-8h
1.yüz	235	124	122	141	169	189	255	374	572
2.yüz	227	112	120	151	209	191	264	407	506
Ort	231	118	121	146	188	190	159.5	390.5	539

Borlanmamış takım		
Borlama Sıcaklığı	4 saat borlanmış takımlar	8 saat borlanmış takımlar
850 °C (4 saat) 800 °C (8 saat)		
900 °C		
1000 °C		
1100 °C		

Şekil D.1 : Saha testleri sonucunda kesici takımların aşınma yüzeyleri (2. yüz).

KAYNAKLAR

1. **Baştürk, S., Şenbabaoğlu, F., İslam, C., Erten, M., Lazoğlu, İ., Gülmez, T.** (2010). Titanium machining with new plasma boronized cutting tools, *Manufacturing Technology*, 59, 101-104.
2. **Akkurt, M.** (1996). *Talaş kaldırma yöntemleri ve takım tezgahları*, 3. Baskı, İstanbul.
3. **Bakkal, M.** (2012). İTÜ Makina Fakültesi talaşlı imalat ders notları.
4. **Özdemir, Ö., İpek, M., Zeytin, S.** (2000). Kesici takım malzemeleri, *Mühendis ve Makina dergisi*, sayı 487.
5. **Fernandes, C.M., Senos, A.M.R.** (2011). Cemented carbide phase diagrams: A review, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 29, 405-418.
6. **Kurlov, A. S. and Gusev, A. I.** (2006). Tungsten Carbides and W-C Phase Diagram, *Inorganic Materials*, 42, 121-127.
7. **Özüdoğru, R.E.** (2008). WC-Co sement karbürlerin üretimi ve karakterizasyonu, *doktora tezi*.
8. **Oruç, Ö.,** (2006). Termoreaktif Difüzyon Tekniği ile WC-Co Kesici Takımların Borlanması, *Yüksek Lisans Tezi*.
9. **Özdemir, U., Erten, M.** (2003). Talaşlı imalat sırasında kesici takımda meydana gelen hasar mekanizmaları ve takım hasarını azaltma yöntemleri, *Havacılık ve uzay teknolojileri dergisi*, Cilt 1, Sayı 1, 37-50.
10. **Reed, R.C.,** (2006). The superalloys: Fundamentals and applications, Cambridge university press.
11. **Kahraman, F.,** (2008). Süperalaşımların nitrülenerek yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi, *Doktora tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
12. **Url** **1,**
<http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Super_Alasimlar.pdf>
alındığı tarih: 02.04.2014.
13. **Çelik, Ali,** (2006). Nikel esaslı süperalaşımların talaşlı işlenmesi için SiAlON esaslı kompozit malzemelerin geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
14. **Ezugwu E.O., et al.,** (2003). An Overview of The Machinability of Aero-engine Alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 134, 233-253.
15. **Motorcu, A.R., et al.,** (2013). Evaluation of tool life- tool wear in milling of Inconel 718 superalloy and the investigation of effects of cutting parameters on surface roughness with Taguchi method, *Tehnički vjesnik* 5, 765-774.
16. **Smith, G.,T.** (2008). *Cutting Tool Technology*, Springer press.
17. **Astakhov, V., P.** (2006). *Tribology of metal cutting*, Elsevier press.
18. **Pye, D.,** (2003). Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing, ASM International, Ohio.
19. **Korwin, M.J., Liliental, W.K., Morawski, C.D. and Tymowski, G.J.** (2004). Design of Nitrided and Nitrocarburized Materials, in *Handbook of Metallurgical Process Design*, pp. 545-590, Marcel Dekker Inc., New York.

20. **O'Brien, J.M. and Goodman, D.** (1990). Plasma (Ion) Nitriding, in Metals Handbook vol.4 Heat Treating, pp. 420-425, American Society for Metals, Ohio.
21. **Uglov, V.V., Anishchik, V.M., Astashynski, V.M. et al.** (2005). Modification of WC hard alloy by compressive plasma flow, *Surface & Coatings Technology*, 200, 245-249.
22. **Hamzaoglu, E.E.** (2008). Plazma Nitrürlemenin WC-Co Kesici Uçların Performansına Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
23. **Konigshofer, R., Eder, A., Lengauer, W. et al.** (2004). Growth of the graded zone and its impact on cutting performance in high-pressure nitrogen modified functionally gradient hardmetals, *Journal of Alloys and Compounds*, 366, 228-232.
24. **Saklakoğlu, İ.E., Ceyhun, V., Saklakoğlu, N.** (2006). Plazma Ortamında Azot Aşıl原因 Kesici Takımlarda Takım Ömrünün Belirlenmesi, *Tasarım İmalat Analiz Kongresi*, Balıkesir.
25. **Buytoz, S., Somunkıran, İ.** (2005). Borla kaplanan yüzeyin mikroyapı ve mekaniksel özellikleri, *Makine teknolojileri elektronik dergisi*, 4, 41-45.
26. **Özbek, İ., Bindal, C.** (2002). Mechanical properties of boronized AISI W4 steel, *Surface and Coatings Technology*, 154, 14-20.
27. **Dilektaşlı, E.** (2014). Bazı alaşımlı çeliklerin yüksek sıcaklık aşınma davranışına borlama işleminin etkisi, *Yüksek lisans tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
28. **Uluköy, A., Can, A., Ç.,** (2006). Çeliklerin borlanması, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12, 189-198.
29. **Baştürk, S., Erten, M.** (2006). Borlama ile yüzey sertleştirme çalışmaları, *Mühendis ve makina dergisi*, sayı 563.
30. **Bayca, S., U., Şahin, S.** (2004). Borlama. *Mühendis ve makina dergisi*, sayı 532.
31. **Pengxun, Y.** (1992). "Gaseous boronizing with solid boron-yielding agents" *Thin Solid Films.*, Vol 214, 44-47.
32. **Sinha, A. K.** (1991). Boronizing, *ASM Int, HeatTreating*, bölüm 2, 437-447.
33. **Campos I.** (2005). Effect Of Boron Paste Thickness On The Growth Kinetics Of Fe₂B Boride Layers During The Boriding Proces, *Applied Surface Science*, Meksika.
34. **Guobiao, L., Zhongjian, Z., Zhihai, Q., Xiang, L., Jiahua, W., Feifei, Z.** (2013). Boronizing mechanism of cemented carbides and their wear resistance, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 41, 351-355.
35. **Wei, Q., Yu, Z.M., Ashfold, M. N.R., Ye, J., Ma, L.** (2010). Synthesis of micro- or nano-crystalline diamond films on WC-Co substrates with various pretreatments by hot filament chemical vapor deposition, *Applied Surface Science*, 256, 4357-4364.
36. **Özdemir, U., Erten, M., Gülmez, T.** (2004). İyon (Plazma) Nitrürlemenin Sert Metal Plaket Takımların Serbest Yüzey Aşınmasına Etkisi, *Havacılık Ve Uzak Teknolojileri Dergisi*, 4, 7-18.
37. Verein Deutscher Ingenieure Normen, VDI 3198, VDI Verlag, Dusseldorf, 1991.
38. **Dearnley, P.A. and Bell, T.,** (1985). Engineering the surface with boron based materials, *Surface Engineering*, 1, 203-217.

39. **Tang, W., Wang, S., Lu, F., (2000).** Preparation and performance of diamond coatings on cemented carbide inserts with cobalt boride interlayers, *Diamond and Related Materials*, 9, 1744–1748.
40. **Köksal, S., (2009).** The Characterization of WC-Co Based Materials Boronized within Molten Salt Bath, *Solid State Phenomena*, 144, 261–266.
41. **Saez, A., Arenas, F., Vidal, E., (2003).** Microstructure development of WCoB–TiC based hard materials, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 21, 13–18.
42. **Zachariev, Z., (2011).** *New Superhard Ternary Borides in Composite Materials*, book chapter.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Rifat YILMAZ

Doğum Yeri ve Tarihi: Eskişehir 07.04.1989

Adres: Dübekli Köyü, Bozüyük/BİLECİK

E-Posta: rifatyilmaz89@gmail.com

Lisans 1: İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Lisans 2: İTÜ Makina Fakültesi Makina Mühendisliği

Yayın ve Patent Listesi:

Yılmaz, R., Demir, F., Akbulut, G., Pilatin, S., 2013. Şekillendirilmiş Metal Katotlar ve Elektrokimyasal İşleme Yöntemi ile Süperalaşım Blisk İmalatı, *4. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2013)*, 07-09 Kasım 2013, Kuşadası, İzmir.

Özdemir, E., Yılmaz, R., Parlar, Z., Arı, Ş., 2013. An Analysis of Geometric Parameters' Effects on Flow Characteristic of a Reactive Muffler. *17th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2013*, Istanbul, Turkey.

Demir, F., Yılmaz, R., (2013). Çok Eksenli Elektrokimyasal İşleme Yöntemi ile Blisk Üretimi, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası VI. Ulusal Uçak, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı*, 06-07 Mayıs 2013 / ESKİŞEHİR.

Parlar, Z., Arı, Ş., Yılmaz, R., Özdemir, E., Kahraman, A., 2013. Acoustic and Flow Field Analysis of a Perforated Muffler Design. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol:7, pp. 600-604.