



**TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN SERAMİK FİLMLERİ İLE  
KAPLANMIŞ KARBÜR TAKIMLARIN YÜKSEK HIZLI  
FREZELEME İŞLEMİNDE AŞINMA PERFORMANSININ  
İNCELENMESİ**

**Yusuf Murat DURMAZ**

**Yüksek Lisans Tezi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Fatih YILDIZ**

**2018  
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN SERAMİK FİLMLERİ İLE KAPLANMIŞ KARBÜR  
TAKIMLARIN YÜKSEK HIZLI FREZELEME İŞLEMİNDE AŞINMA  
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

**Yusuf Murat DURMAZ**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fatih YILDIZ**

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği**

**Erzurum**

**2018**

**Her hakkı saklıdır**

**T.C.**  
**ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**TEZ ONAY FORMU**

---

**TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN SERAMİK FİLMLERİ İLE KAPLANMIŞ KARBÜR  
TAKIMLARIN YÜKSEK HIZLI FREZELEME İŞLEMİNDE AŞINMA  
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Fatih YILDIZ danışmanlığında, Yusuf Murat DURMAZ tarafından hazırlanan bu çalışma 01/10/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği** /(.../...) ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. İrfan KAYMAZ	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Kemal YILDIZLI	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Fatih YILDIZ	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

**Doç. Dr. Arzu GÖRMEZ**  
**Enstitü Müdürü**

## **ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

01 / 10 / 2018

İmzası

Yusuf Murat DURMAZ

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN SERAMİK FİLMLERİ İLE KAPLANMIŞ KARBÜR TAKIMLARIN YÜKSEK HIZLI FREZELEME İŞLEMİNDE AŞINMA PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Yusuf Murat DURMAZ

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih YILDIZ

Bu çalışmada karbür kesici takım malzemesinin aşınma performansını iyileştirmek için katodik ark fiziksel buhar kaplama yöntemi ile nitrür esaslı kaplamalar taban malzeme üzerine büyütülmüştür. Yüksek hızlı frezeleme işleminde kullanılan takımlar TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN seramik filmler ile kaplanmıştır. Kaplama işlemleri, hem prizmatik test numuneleri üzerine hem de karbür parmak frezeler üzerine uygulanmıştır. Kaplamaların karakterizasyonu prizmatik test numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Üretilen kaplamaların yapısal ve mekanik özellikleri taramalı elektron mikroskobu, X-ışını kırınım ölçer, calotest kalınlık ölçümü, çizik testi, mikrosertlik cihazı ve optik profilometre yardımı ile belirlenmiştir. Numunelerin tribolojik özellikleri, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> karşı bilya kullanılarak ileri-geri (reciprocating) aşınma testi şeklinde ve kuru şartlarda tespit edilmiştir. Kaplamaların gerçek çalışma performanslarının belirlenmesi için işlemsiz ve kaplanmış parmak frezeler ile Impax çeliği iş parçası CNC dik işleme merkezinde işlenmiştir. G kodları ve takım yolları SolidCAM iMachining yazılımı ile oluşturulmuştur. Yazılımda kesme hızı, ilerleme ve yana kayma değerleri geometri, takım ve iş parçası malzemesine göre otomatik ve değişken olarak belirlenmiştir. CNC ile işleme sonrası, takımların aşınma performansı taramalı elektron mikroskobu ve kütle kaybı yöntemi ile incelenmiştir. Ayrıca kesme işlemi sonrası Impax çeliği iş parçasının yüzey pürüzlülüğü değerleri belirlenmiştir. Çizik testi sonuçlarına göre en yüksek adezyon sonuçları TiAlN kaplama için elde edilmiş ve L<sub>c1</sub> kritik yük değeri yaklaşık 30 N olarak belirlenmiştir. Aşınma testlerine göre, en yüksek aşınma oranı TiAlSiN kaplama için ve en düşük aşınma oranı işlemsiz karbür malzeme için elde edilmiştir. Yüksek hızda frezeleme işlemi sonrası, en düşük yan kenar aşınma genişliğine sahip kaplama türü TiAlN kaplama olarak belirlenmiştir.

**2018, 64 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Katodik ark fiziksel buhar kaplama, TiAlSiN, AlCrN, TiAlN, Aşınma, Yüksek hızlı frezeleme, Akıllı imalat, SolidCAM iMachining

## ABSTRACT

MS. Thesis

### **THE WEAR PERFORMANCE of CARBIDE TOOLS COATED with TiAlSiN, AlCrN and TiAlN CERAMIC FILMS in HIGH SPEED MILLING PROCESS**

Yusuf Murat DURMAZ

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih YILDIZ

Nitride-based coatings are applied by cathodic arc physical vapour deposition (CAPVD) to improve the tribological properties of cutting tools. The present study examines the tool life of carbide tools coated with TiAlSiN, AlCrN and TiAlN films in intelligent machining process. Coating process was applied on both prismatic carbide test specimens and solid carbide end mills by CAPVD method. Coating characterization was carried out on the test specimens. The structural and mechanical properties of different nitride-based coatings were investigated by means of field emission scanning electron microscope, X-ray diffractometer, scratch tester, calotester, microhardness device and optical profilometer. The tribological properties of specimens were examined in dry conditions by using reciprocating sliding wear test with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ball as a counter material. Impax steel was machined in CNC vertical machining centre with uncoated and coated carbide end mills in order to determine the actual operating performance of the coatings. The G codes and tool paths were created in the SolidCAM iMachining software. The cutting speed, feeds and overlap values were selected automatically and variably depending on geometry, tool and work piece materials. After the machining process, the wear performance of tools were examined by SEM and the mass losses on the tools were determined by the precision scale. In addition, the surface roughness values of the impax steel were measured from the finish surfaces. According to the scratch test results, the best adhesion results were obtained for TiAlN coating and the Lc<sub>1</sub> critical load value was determined as about 30 N. The reciprocating sliding test results showed that the highest wear rate was obtained for the TiAlSiN coated specimen and the lowest wear rate was obtained for the untreated specimen. Flank wear was observed on the tools after the milling process and the highest wear resistance was obtained TiAlN coated end mill.

**2018, 64 pages**

**Keywords:** Cathodic arc physical vapor deposition, TiAlSiN, AlCrN, TiAlN, Wear, High speed milling, Intelligent machining, SolidCAM iMachining

## TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans tez çalışmam boyunca ilgisini, bilgisini esirgemeyen, tecrübelerinden yararlanarak daha iyi çalışmalar ortaya koymamı sağlayan, çalışma temposu arasında bana vakit ayırıp her türlü yardımda bulunan saygıdeğer danışmanım ve hocam Doç. Dr. Fatih YILDIZ' a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca laboratuvar uygulamalarında bilgi ve tecrübesini benimle paylaşan, destek ve sabrıyla hep yanımda olan Arş. Gör. İlyas HACISALİHOĞLU hocama teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez yazımı sırasın da bilgilerini benimle paylaşıp yardımda bulunan değerli arkadaşım Arş. Gör. Gürkan KAYA' ya teşekkür ederim.

Tez çalışmamdaki katkılarından dolayı İnan Coting (İstanbul) firması çalışanlarına ve firma sahibi Muhammet ŞEN' e teşekkürü bir borç bilirim.

Lisans ve yüksek lisans döneminde hep yanımda olan, manevi desteğini hep hissettiğim Naciye TOLAN' a teşekkür ederim.

Bu yaşlara gelmemde büyük emekleri olan, yaşantımın her anında tüm desteklerini hissettiğim babam Abdullah DURMAZ, annem Gülşen DURMAZ ve ablalarım teşekkürlerimi sunarım.

**Yusuf Murat DURMAZ**

**Eylül 2018**

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	iv
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	vii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	ix
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. KURAMSAL TEMELLER</b> .....	8
2.1.Fiziksel Buhar Kaplama (PVD).....	9
2.1.1. PVD Tekniği ile Yapılan Kaplamaların Özellikleri.....	9
2.1.2.PVD Kaplama Yöntemlerinin Sınıflandırılması.....	10
2.1.2.1. İyon ile Kaplama Yöntemi.....	10
2.1.2.2. Sıçratma ile Kaplama Yöntemi.....	11
2.1.2.3. Buharlaştırma ile Kaplama Yöntemi.....	11
2.1.2.3.a. Katodik Ark Fiziksel Buhar Kaplama Yöntemi.....	11
2.2. İmalat Yöntemleri.....	12
2.2.1. Talaşlı İmalat Yöntemi.....	13
2.2.1.1. Talaş Olumunun Teorisi.....	14
2.2.1.2.Kesici Takım Teknolojisi.....	16
2.3.Sinterlenmiş Karbür Kesici Takımlar.....	16
2.4.Takım Ömrü ve Aşınması.....	16
2.5.iMachining Nedir?.....	17
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	21
3.1. Materyal.....	21
3.2. XRD Analizleri.....	22
3.3. Kaplama Kalınlığı Analizleri.....	22
3.4. Mikro Sertlik Ölçümleri.....	23
3.5. Aşınma Deneyleleri.....	24
3.6. Çizik Testi.....	25
3.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri.....	26
3.8. 3D Yüzey Profilometre Analizleri.....	26
3.9. SolidCAM iMachining Programlama ve Yüksek Hızlı Frezeleme İşlemi.....	27
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA</b> .....	31



4.1. XRD Analizleri .....	31
4.2. Calotest Analizleri.....	32
4.3. Mikro Sertlik Bulguları .....	34
4.4. Çizik Testi Bulguları .....	35
4.5 Aşınma Deneyi Bulguları.....	38
4.5.1. Sürtünme Katsayısı Bulguları .....	38
4.5.2. Aşınma Oranı ve Aşınma İzi SEM Görüntüleri.....	38
4.6. Parmak Frezelerde Oluşan Aşınma Bulguları.....	40
4.7. Parmak Frezelerdeki Kütle Kaybı Analizleri.....	42
4.8. 3D Yüzey Profilometre Analiz Sonuçları .....	43
<b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>44</b>
5.1. Sonuçlar .....	44
5.2. Öneriler .....	46
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>47</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>51</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
A°	Angstrom
$\lambda$	Dalga boyu
°	Derece
V	Kesme hızı
n	Kesme parametresi
Lc	Kritik Yük
c	Malzemeye bağlı sabit
$\mu\text{m}$	Mikronmetre
T	Takım ömrü
sn	Saniye
HV	Vickers sertlik birimi

### **Kısaltmalar**

CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
DC	Doğru Akım
PVD	Fiziksel Buhar Kaplama
HSS	High Speed Steels
KAFBK	Katodik Ark Fiziksel Buhar Kaplama
CVD	Kimyasal Buhar Kaplama
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
XRD	X ışını kırınım ölçer

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Katodik ark PVD sistemi. ....	13
Şekil 2.2 2 boyutlu ortogsnal kesme modeli ve modelde yer alan önemli geometrik büyüklükler .....	16
Şekil 2.3 Ortogonal kesme modelinde deformasyon bölgelerinin gösterimi .....	16
Şekil 2.4 CAM programlamada İmachining stratejisi .....	19
Şekil 2.5 Ortogonal kesme modeli üzerinde kesme düzlem uzunluğu ve alanının değişimi .....	20
Şekil 2.6 Yana kayma değerine bağlı olarak kesme/kavrama açılarının gösterimi .....	21
Şekil 3.1 İşlemsiz ve kaplanmış kesici takımlar .....	22
Şekil 3.2 X ışınımı kırınım ölçer .....	23
Şekil 3.3 Calotest yöntemi .....	24
Şekil 3.4 Mikrosertlik cihazı .....	24
Şekil 3.5 Tribometre cihazı .....	25
Şekil 3.6 Parmak freze üzerinde yan kenar aşınma bölgesi .....	26
Şekil 3.7 Taramalı elektron mikroskopu (SEM) .....	27
Şekil 3.8 3D profilometre cihazı .....	28
Şekil 3.9 CNC freze tezgâhı .....	29
Şekil 3.10 CAM programlamada tanımlanan stok ve hedef modellerinin gösterimi.....	29
Şekil 3.11 Test edilecek takımların kullanılacağı parça.....	30
Şekil 3.12 SolidCAM işleme adımları .....	30
Şekil 3.13 İmachining işleminde kullanılan kesme parametrleri .....	31
Şekil 4.1 TiAlSiN ile kaplanmış numunelerin XRD grafiği .....	32
Şekil 4.2 AlCrN ile kaplanmış numunelerin XRD grafiği .....	33
Şekil 4.3 TiAlN ile kaplanmış numunelerin XRD grafiği .....	33
Şekil 4.4 TiAlSiN kaplamasına ait calotest görüntüleri .....	34
Şekil 4.5 AlCrN kaplamasına ait calotest görüntüleri.....	34
Şekil 4.6 TiAlN kaplamasına ait calotest görüntüleri .....	35
Şekil 4.7 İşlemsiz, TiAlSiN, AlCrN, TiAlN ile kaplanmış numunelerin sertlik değerleri.....	35

Şekil 4.8 TiAlSiN çizme testi esnasında uygulanan yük ile sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti arasındaki ilişki ile çizik izlerine ait optik mikroskop görüntüleri.....	36
Şekil 4.9 AlCrN çizme testi esnasında uygulanan yük ile sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti arasındaki ilişki ile çizik izlerine ait optik mikroskop görüntüleri.....	37
Şekil 4.10 TiAlN çizme testi esnasında uygulanan yük ile sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti arasındaki ilişki ile çizik izlerine ait optik mikroskop görüntüleri.....	38
Şekil 4.11 İşlemsiz, TiAlSiN, AlCrN, TiAlN ile kaplanmış numunelerin sürtünme kat sayıları grafiği .....	40
Şekil 4.12 İşlemsiz, TiAlSiN, AlCrN, TiAlN ile kaplanmış numunelerin aşınma oranları grafiği .....	41
Şekil 4.13 Aşınma izlerinin SEM görüntüleri.....	42
Şekil 4.14 Kesici takımların yan kenar aşınma genişlikleri .....	43
Şekil 4.15 Karbür takımların ultrasonik yıkama öncesi ve sonrası ağırlık farkının grafiksel gösterimi.....	44
Şekil 4.16 İş parçasının 3D profilometre yüzey görüntüleri .....	45

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Yüzey mühendisliğinde uygulanan metodlar. ....	9
Çizelge 2.2 PVD kaplamaların sınıflandırılması .....	11
Çizelge 2.3 İmalat yöntemlerinin sınıflandırılması.....	14
Çizelge 2.4 Malzeme uzaklaştırma işlemleri .....	14
Çizelge 3.1 Kaplama parametreleri.....	22
Çizelge 3.2 Aşınma parametreleri.....	25
Çizelge 3.3 Plastik enjeksiyon kalıp çeliği kimyasal bileşimi .....	27
Çizelge 4.1 Kaplama kalınlıkları .....	34
Çizelge 4.2 Kaplanmış numunelere ait çizik testi kritik yük değerleri .....	39
Çizelge 4.3 İş parçasının frezeleme işlemi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri .....	45

### 1. GİRİŞ

Talaşlı imalat, üretim yöntemleri içerisinde en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Talaşlı imalat yöntemleri birincil üretim yöntemi olarak kullanılabilirdiği gibi, döküm ve plastik şekil verme yöntemleriyle üretilmiş malzemelerin uygulamada kullanılması için son işlem olarak da kullanılmaktadır. Talaşlı imalat yönteminde üretilecek iş parçasına istenilen geometriyi kazandırmak için uygun takım tezgâhı ve kesici takımlar kullanılıp talaş kaldırarak, hedeflenen boyut ve yüzey kalitesi sağlanır (Yürekli 2012).

Talaşlı imalat yönteminde kesme işlemi, iş parçasının kesici takım önündeki plastik deformasyonu ve deforme olan bu katmanın talaşa dönüşmesi ile gerçekleşir. Bu yöntem çoğunlukla metalleri şekillendirmek için uygulansa da diğer malzemeler (plastikler, kompozit malzemeler ve cam) de aynı yöntem ile şekillendirilebilir.

Talaşlı imalatın geçmişten günümüze gelişimi incelendiğinde, şekillendirilecek malzemelerin genellikle ahşap olduğu görülmektedir. 1750’li yıllardan önce mühendislik uygulamalarında ağırlıklı olarak ahşap malzemeler tercih edilmiştir. Ağaçtan yapılan tornalar ve diğer takım tezgâhları, ahşap parçaları istenilen geometriye getirmek için kullanılmıştır. Daha sonra sanayide buhar türbinlerinin üretimindeki büyük metal silindirlerin yüksek hassasiyetle üretilmesi ihtiyacı doğduğundan talaşlı imalat ilk önemli gelişimini bu silindirlerin üretimini gerçekleştirerek yaşamıştır (Mamaghani 2016).

1860’lı yıllardan sonra, mevcut bir malzemede gerekli şekillerin nasıl elde edilebileceği problemi genellikle çözülebilmektedir. Ancak sertleştirilmiş ve menevişlenmiş yüksek karbonlu çeliklerin işlenmesi sırasındaki sorunlar devam etmiştir. Bu yıllardaki en büyük sorun olan üretimdeki yavaşlık, takım çeliklerinin kalitesinin iyileştirilmesine rağmen devam etmiştir. İlerleyen yıllarda metal kesme teknolojisi, talaşlı imalat yöntemiyle beraber sanayide ilgili alanlarla beraber gelişmiş ve sade karbonlu takım çeliklerinin yerine yüksek hız ve sementit karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Bu sayede kesme hızlarında iyileştirmeler yapılmış ve kesici takım imalatçıları en yüksek performansta çalışabilecek kesici takımlar üretmeye başlamıştır.

## 1. GİRİŞ

---

İkinci Dünya Savaşı ile beraber bilgisayar kontrollü cihazlarla üretim yapılarak işçilik masrafları azaltılıp, üretim hızlarında artış sağlanmıştır. Kesici takım imalatçıları ise takım ömrünü ve kesme hızını maksimum seviyeye çıkarmak için kesici takım geometrilerini en verimli şekilde tasarlamaya çalışmışlardır. Ayrıca, yeni soğutma sıvıları ve yağlayıcıların üretilmesi ile takım ömrü ve iş parçası yüzey kalitesindeki iyileşmelere katkıda bulunulmuştur (Mamaghani 2016).

Teknolojinin çok hızlı ilerlediği günümüzde, dünya nüfusunun hızlı bir şekilde artışı, teknolojik ürün talebinin de hızla artmasına sebep olmuştur. Hammadde, enerji ve işçilik maliyetlerinin yüksek oluşu, üretilen makine ve sistemlerin maliyetini artırmıştır. Dolayısıyla kullanıcılar, yüksek fiyatlara alınan bu ürünlerden en yüksek verimi almak istemektedir. Bu durum kaliteyi de beraberinde getirmiştir. Bir makine elemanı üzerine gelen yükleri büyük oranda yapısal özellikleriyle, aşınma, yorulma, korozyon gibi hasarları ise yüzey özellikleri ile karşılar. Dolayısıyla yüzey özelliklerinin önemli olduğu yerlerde sadece yüzeye ait özellikleri iyileştirmek hem maliyet hem de zaman açısından büyük tasarruf sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak yüzey mühendisliği ve yüzey işlemi terimleri ortaya çıkmıştır (Yıldız 2011). Yüzey işlemleri, biyomedikal protezler, malzeme şekillendirme ve döküm aletleri gibi birçok uygulamada kullanılmakta olup, günümüz teknolojisi ile birlikte gelişmektedir. Yüzey işlemleri ile malzemeye kazandırılacak en önemli özellikler ise sertlik, tokluk, aşınma-korozyon direnci ve kimyasal kararlılıktır (Faga et al. 2007).

Mühendislik ve teknolojideki dinamik gelişmeler, imalat sanayisi üzerinde de ciddi etkiye sebep olmuştur. Bu etki sonrasında daha iyi mekanik özelliklere ve aşınma direncine sahip takım malzemelerinin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Kesici takım olarak kullanılacak malzemelerin, üzerine gelen yükleri karşılayacak kadar dayanımı yüksek ve aynı zamanda aşınma direncinin yüksek olması gerekmektedir. Ancak pratikte bu iki özelliği malzeme üzerinde herhangi bir modifikasyon yapmadan elde etmek mümkün olmamaktadır. Söz konusu iki özelliği bir malzemedeki toplamının en iyi yolu malzemeye uygun bir yüzey işlemi uygulamaktır. Yüzey işlemi olarak da genellikle kesici takımlar üzerine kaplama işlemi uygulanmaktadır (Löffler 1994; Heinke et al. 1995; Dobrzański et al. 2006; Chen et al. 2007; Avila et al. 2008; Zhou et al. 2010).

Yüzeylerin aşınmaya karşı dayanıklı olması için yenilenen sert kaplamalar çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu alanlardan birisi olan kesici takımlar genellikle TiN, CrN, TiCN, TiAlN, ZrN, TiZrN, DLC ve diğer sert nitrür ve karbürler ile kaplanmaktadır ( Sundgren 1985; Kerkhofs, M. et al. 1994; Prengel et al.1998). Bu tür sert seramik kaplamalar genellikle Fiziksel Buhar Kaplama (PVD) ve Kimyasal Buhar Kaplama (CVD) prosesleri kullanılarak büyütülmektedir (Sproul 1996;Wei et al. 2002). CVD yönteminde yüksek sıcaklıktan dolayı takımın sertliğinde azalmalar oluşabilmektedir. PVD yönteminde ise daha düşük çökelme sıcaklıkları olduğundan, sertlik kaybındaki olumsuz etki ortadan kalkmaktadır (Nordin et al. 2000). Her iki yöntemde de kaplama işlemleri sonrası taban malzemelerin kullanım bakımından ömrünün 2 ila 10 kat arttığı yapılan çalışmalarla tespit edilmiştir (Mandev 2018).

Sert kaplamalar, malzemelerin ve kesici takımların uzun süreli kullanımı için 1970'lerden beri gelişimini devam ettirmiştir. Bu gelişmelerle birlikte, hem üretimin teknolojik süreci hem de sertlik, aşınma ve oksidasyon direnci sürekli olarak geliştirilmektedir (Musil 2000).

TiN kaplama, kesici takımlar için çok yaygın olarak kullanılan yaygın bir kaplama türü olup, başarıyla uygulanmış ilk PVD takım kaplamasıdır (Sproul 1996; Santos et al. 2004). PVD yöntemi ile büyütülen TiN kaplamalar oldukça yoğun, yüksek sertliğe sahip ve altın sarısı rengindedir. TiN kaplamaların aşınma davranışı ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmış ve çalışmaların ortak sonucu olarak kaplama işleminin aşınma davranışına olumlu katkı yaptığı belirlenmiştir (Wei et al. 2002; Zeghni and Hashmi 2004). Özellikle takım çelikleri üzerine yapılan TiN kaplamaların düşük kesme hızlarında çok iyi aşınma direncine sahip olduğu rapor edilmiştir (Nickel et al. 2000). Ancak taban malzemenin plastik deformasyonu sonucu kaplamanın hasara uğraması nedeniyle kaplama işlemi öncesi plazma nitrüleme işlemi uygulanarak kaplanmış yüzeylerin yük taşıma kapasitesi artırılmış ve takımların aşınma dirençleri önemli oranda artırılmıştır (Zeghni and Hashmi 2004).

TiN kaplamaların sanayide sıklıkla kullanılmasının sebebi, kesme uygulamalarındaki üstün performanslarıdır. Ancak kesim sırasında kaplamaların maruz kaldığı oksidasyon ve sertlik kaybından dolayı bu sorunları gidermek için yeni arayışlar



## 1. GİRİŞ

---

içerisine girilmiştir. Bu sebeple kaplamanın içerisine Al eklenerek TiAlN kaplaması elde edilmiştir. TiAlN kaplamalarda bulunan Al, yüksek sıcaklıklarda oksijenle birleşerek yüzeyde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakası oluşturup oksidasyon sorununa çözüm üretilmiştir (Castanho and Vieira 2003). Ayrıca TiAlN kaplamaların oldukça yoğun bir yapıda oluşması, taban malzemeye adezyonunun çok iyi olması ve üretim prosesleri esnasında çok önemli bir özellik olan düşük ısı iletimi, temel avantajları arasında sıralanabilir. TiAlN ince filmler yüksek sertlik, çok iyi oksidasyon ve korozyon direncine sahip olduğu için aşınma dirençli kaplamalar olarak endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. TiAlN kaplamalar fiziksel buhar kaplama teknikleri (katodik ark, saçılma, buharlaştırma ve iyon-kaplama gibi) ile birçok malzeme üzerine başarı ile uygulanarak çok üstün mekanik özellikler elde edilmiştir (Totik et al. 2001; Man et al. 2004). Özellikle yüksek sıcaklıklarda üstün aşınma performansı gösteren bu kaplama, genellikle dökme demir ve alüminyum-silikon alaşımları gibi yüksek hızlarda aşındırma hızı gerektiren malzemelerin kesiminde tercih edilmektedir (Santos et al. 2004).

Son yıllarda, TiAlSiN dörütlü kaplaması (quaternary coating), sahip olduğu yüksek mekanik özellikler (sertlik ve elastisite modülü), oksidasyon direnci ve üstün tribolojik özellikleri sebebiyle dikkat çekmektedir (Zukerman et al. 2007; Cao et al. 2018). TiAlN fazına Si ilavesinin kaplama tabakasının üstünde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşumuna katkı sağladığı bulunmuştur (Löfller 1994; Teer 1996; Zhou et al. 2010; Parlinska 2016). Ayrıca Chen et al. ve Avila et al. kaplama tabakası içerisinde oluşan SiN<sub>x</sub> fazının yüksek kimyasal inertliği sayesinde kaplamanın oksidasyon direncinin arttığını tespit etmişlerdir. TiAlSiN kaplamalarda Si içeriğinin tribolojik özellikler üzerindeki etkilerini incelendiği çalışmalarda, sürtünme katsayısının artan Si içeriğinden bağımsız olduğunu ve Si oranındaki artış ile aşınma direncinin arttığı gözlemlenmiştir (Totik et al. 2001; Philippon et al. 2011; Tillmann and Dildrop 2017).

Zhu et al. (2016), tarafından yapılan çalışmada, katodik ark fiziksel buhar kaplama yöntemi ile büyütülen TiAlSiN kaplamaların yüksek sertlik, aşınma ve oksidasyon direnci, termal kararlılık ve yüksek kesme performansı sağladığı ifade edilmiştir. Aynı çalışmada söz konusu kaplamanın güvenilirliğini belirleyen temel parametrenin, kaplama ile taban malzeme arasındaki adezyon olduğu ve TiAlSiN

## 1. GİRİŞ

---

kaplamaların üretiminde oluşan gevrek  $\text{Si}_3\text{N}_4$  fazının düşük adezyon kuvvetlerine sebep olduğu tespit edilmiştir.

Tanaka et al. (2001), yaptıkları çalışmada, katodik ark fiziksel buhar kaplama yöntemi ile karbür freze uçları üzerine (Al, Ti, Si)N kaplama yaparak, kaplanmış takımların aşınma ve korozyon dirençlerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada sonuç olarak (Al, Ti, Si)N filmlerin (Al, Ti,)N ve (Ti, Al)N filmlere göre daha yüksek sertlik ve oksitlenme sıcaklığına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca (Al, Ti, Si)N ile kaplanmış takımların, sert malzemelerin yüksek hızlarda işlenmesinde (Al, Ti)N ve (Ti, Al)N ile kaplanmış takımlardan daha yüksek bir aşınma direnci ve kesme performansı gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Düşük ve orta kesme hızlarında kullanılacak kesici takım malzemeleri üzerine uygulanan bir diğer yaygın kaplama türü CrN kaplamalardır (Antonov et al. 2018). Ancak yüksek kesme hızında yapılan talaşlı imalat operasyonlarında sıcaklık  $900^\circ\text{C}$ 'ye kadar çıkabilmektedir (Chen et al. 2007). CrN kaplamalar ise  $600^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklar için uygun bir kaplama malzemesi değildir. CrN kaplamaların etkinliğini artırmak için bulunan çözümlerden birisi Al ilavesi elde edilen AlCrN kaplamasıdır.

AlCrN kaplamalar, yüksek aşınma ve oksidasyon direnci, iyi kızıl sertlik ve yüksek sıcaklıklarda sahip olduğu termal kararlılıkları ile ön plana çıkmıştır ( Sundgren 1985; Kerkhofs et al. 1994; Heinke et al. 1995; Sproul 1996; Prengel et al. 1998; Wei et al. 2002; Zeghni and Hashmi 2004; Antonov et al. 2018;). Fox-Rabinovich et al. (2006), TiAlN ve AlCrN ile kaplanan kesici takımların aşınma direncini yüksek sıcaklıklarda kıyaslamış ve AlCrN kaplı kesici takımların daha iyi aşınma direncine, dolayısıyla daha uzun takım ömrüne sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Kalss et al. (2006), yaptıkları çalışmada AlCrN kaplı kesici takımların TiAlN kaplı takımlara göre daha az aşındığını ve bu durumun sebebinin ise AlCrN kaplamanın ısı iletkenliğinin TiAlN'den daha düşük olmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Ayrıca AlCrN kaplamaların oksidasyon direncinin, işlem sıcaklığındaki artışla birlikte azaldığı tespit edilmiştir.

## 1. GİRİŞ

---

Gong et al. (2017) tarafından yapılan çalışmada karbür taban malzeme üzerine büyütülen TiAlN ve AlCrN kaplamaların aşınma davranışı standart aşınma deneyi ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada AlCrN ile kaplanmış malzemenin daha düşük sürtünme katsayısı ve daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışmada AlCrN kaplamaların tribolojik özelliklerinin üstün olması, kaplamanın taban malzemeye adezyonunun yüksek olması ile ilişkilendirilmiştir.

CAM (computer aided manufacturing) programları, CNC (computer numerical control) tezgâhlarda karmaşık geometriye sahip veya elle kod yazılması imkânsız olan parçaların işlenmesi için gerekli olan NC (numerical control) kodlarının oluşturulduğu programlardır. Bir CAM programında standart olarak tanımlanması gereken temel işleme parametreleri kesme hızı veya ana iş mili devri, ilerleme miktarı ve yana kayma değerleridir. Bu parametreler temel olarak, kesici takım malzemesi, iş parçası malzemesi ve tezgâh kapasitesine bağlı olarak değişir. Etkili bir talaş kaldırma işlemi için bu parametrelerin optimizasyonu büyük önem taşır. Bu değerler kişisel tecrübeler ışığında deneme-yanılma metodu ile belirlenebileceği gibi, takım üreticisi firmalar tarafından gerekli Ar-Ge çalışmaları yapılarak hazırlanan kesici takım kataloglarından da seçim yapılabilir.

Standart CAM programlarında seçilen işlem parametreleri herhangi bir operasyon için işlem sonuna kadar belirlenen seviyede sabit kalır. Son dönemde yaygınlaşmaya başlayan yeni nesil CAM programlama mantığında ise kesme parametreleri operasyon boyunca sabit kalmayıp, işlenen geometrinin kritik bölgelerinde değişken değerler olarak daha etkin ve kısa süreli bir kesim sağlanmaktadır. Söz konusu yöntem ile yapılan üretim işlemi akıllı talaşlı imalat (intelligent machining) olarak isimlendirilmektedir.

SolidCAM programı, SolidWorks bilgisayar destekli tasarım programı ile bağlantılı çalışan bir yazılımdır. SolidCAM programı içerisinde bulunan iMachining modülü ise CAM programında oluşturulacak takım yolları için bulunan bir yeniliktir. CNC işleme teknolojisindeki bu büyük yenilik, takım yollarındaki ilerlemeleri ve kesme açılarını optimize ederek çok daha derin ve hızlı bir kesime imkân tanımaktadır. iMachining teknolojisi, yapılacak işlemler için uygun algoritmalar kullanmak suretiyle takım yolunun optimize edilmesi, işleme süresinin azaltılması ve takım üzerine gelen

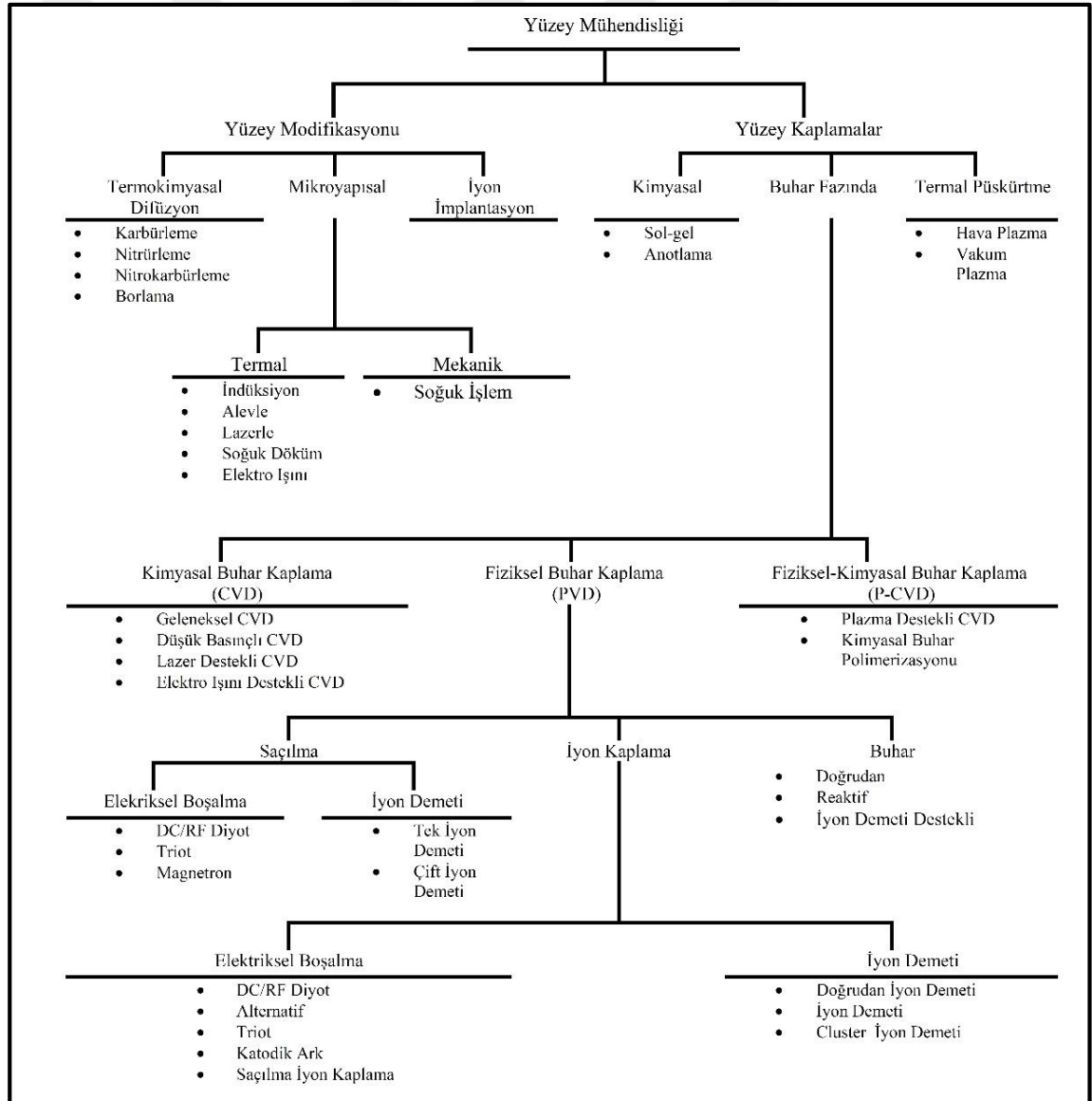
yükleri azaltarak takım aşınmasının minimize edilmesini hedeflemektedir (Sultana et al. 2016). Bu hedef doğrultusunda iMachining modülü, takım ve iş parçası malzemesi makine kapasitesi ve işlenecek geometri ile uyumlu olarak CNC tezgâhın programlanması için G kodu oluşturur. Kesme hızı, takım yolu, takım ilerlemesi, yana kayma miktarı ve kesme derinliği gibi özellikleri de en yüksek talaş kaldırma oranının elde edilebilmesi için otomatik olarak oluşturur (Dudukovi and Ogrizović 2016).

Literatürde yapılan TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN seramik filmler ile kaplanmış malzemelerin aşınma performanslarının incelendiği çalışmalar dikkate alındığında, kaplamaların genel olarak standart deney numuneleri üzerinde karakterize edildiği görülmektedir. Ancak standart deney yöntemleri ile yapılan incelemeler, gerçek durumun tam olarak simüle edilememesi ve bazı etkenlerin (geometri etkisi, talaş kaldırma esnasında oluşan sıcaklık vb.) hesaba katılamaması sebebiyle hatalı sonuçlar verebilmektedir. Bu sebeple kesici takım malzemesi olarak kullanılacak bir malzemenin ve bu malzemeye uygulanacak yüzey işlemlerinin, kesme ve aşınma performansına etkisinin tam olarak belirlenebilmesi için gerçek kesme koşullarında test edilmesi büyük önem taşımaktadır. Dolayısı ile bu tez çalışmasında, katodik ark fiziksel buhar kaplama yöntemi ile Tungsten Karbür (WC)'den imal edilmiş taban malzeme ve parmak freze kesici takımları üzerine büyütülmüş TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN seramik filmlerinin aşınma performansları hem standart deney prosedürleri ile hem de gerçek kesme koşulları altında incelenmiştir. Ayrıca literatürde yer alan gerçek kesme işlemleri ile ince filmlerin karşılaştırıldığı çalışmalarda, standart CAM programlama mantığı ile kesim işlemi yapılarak kesme parametreleri sabit tutulmuştur. Bu çalışmada ise ince filmler ile kaplanan kesici takımların aşınma performansları akıllı talaşlı imalat yöntemi kullanılarak ve kesme parametrelerinin dinamik olduğu bir süreçle ele alınmıştır.

### 2. KURAMSAL TEMELLER

Gelişen teknoloji, malzemelerden beklenen yüksek performans talebini artırmıştır. Bu yüksek performans özellikleri yüzey modifikasyon teknikleriyle artırılmaktadır. Malzemelerin yüzeyleri, bazı özelliklerin kazandırılması amacıyla çeşitli yüzey işlemlerine tabi tutulmaktadır. Bazı yüzey işlemleri ve uygulama sebepleri ise şu şekilde sıralanabilir: korozyonu önlemek için boyama ve kaplama, bası artık gerilmesi oluşturmak ve yüzey sertliğini artırmak için bilya püskürtme, martenzit tabakası oluşturmak için su verme, tribolojik ve korozif özellikleri iyileştirmek için ince film kaplama ve yüzeyin kimyasını değiştirme. Çizelge 2.1'de yüzey işlemlerinin bir sınıflandırılması yapılmıştır.

**Çizelge 2.1** Yüzey mühendisliğinde uygulanan metodlar (Alsaran 2001).



Yüzey kaplama tekniklerinde maddenin dördüncü hali olan plazma hali yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Plazma; içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral atom veya molekül içeren bir karışımdır. Plazma doğada güneş ve bazı yıldızlar içinde, yıldırım ve elektrik boşalmalarında görülür (Yıldız 2005). Plazmanın kullanıldığı prosesler diğer işlemlerle karşılaştırıldığı zaman daha ekonomik, daha düşük işlem sıcaklığı, daha kısa işlem zamanı, daha düşük gaz tüketimi ve daha hızlı difüzyon oluşumu gibi avantajlara sahiptir.

### 2.1.Fiziksel Buhar Kaplama (PVD)

Fiziksel buhar kaplama (PVD) prosesi, vakum etkisindeki bir malzemenin saçılma ya da buharlaştırma ile yüzeyden atomların koparılarak kaplama yapılacak malzemenin yüzeyine yoğunlaştırılması işlemidir. Bu yöntemde kaplamalar, yüksek vakum ( $10^{-6}$ -10 Pa) ve düşük sıcaklıklarda ( $500^{\circ}\text{C}$ 'nin altında) gerçekleştirilir. Kaplama adezyonu kaplama yapılacak malzemenin yüzey temizliğine ve malzemenin kinetik enerjisine bağlı olarak farklılık gösterir (Yıldız 2011).

PVD ile kaplama yöntemi diğer kaplama yöntemleri ile karşılaştırıldığında; düşük sıcaklıklarda çalışma, kaplama kalınlığının homojen olması, çevre kirliliğine yol açmaması ve en popüler ve gelişmeye açık yöntem olması gibi avantajlarının olduğu görülmektedir (Mamaghani 2016).

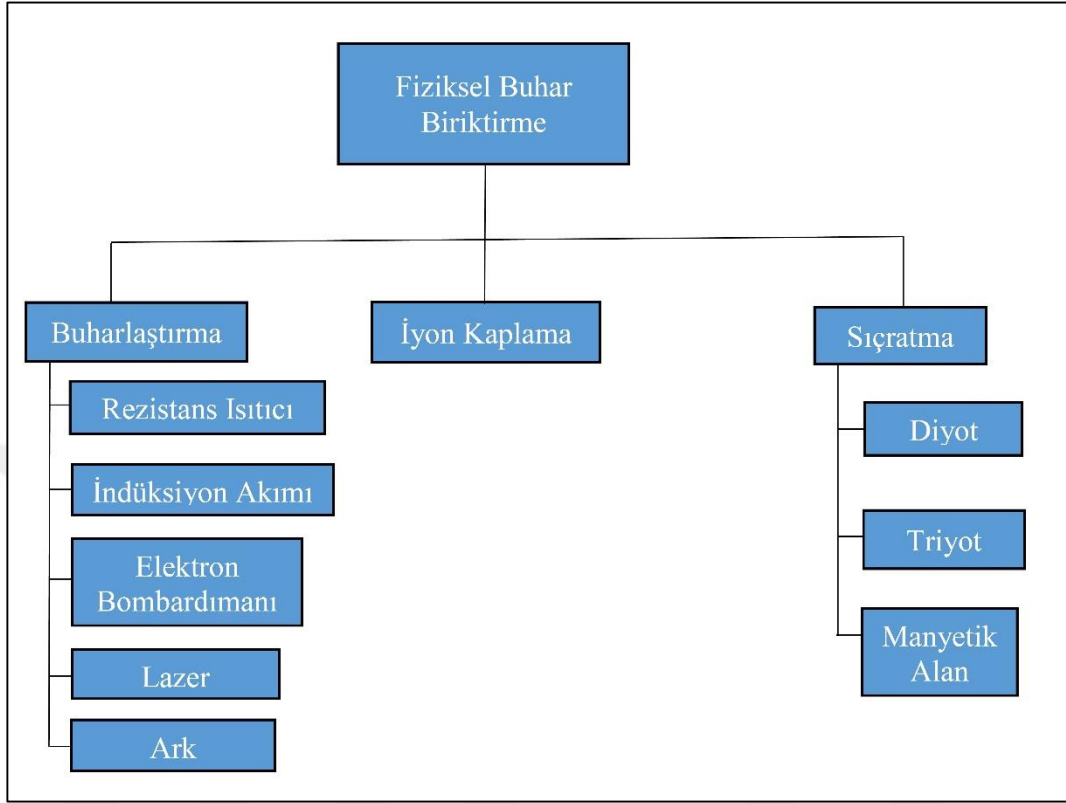
#### 2.1.1. PVD Tekniği ile Yapılan Kaplamaların Özellikleri

PVD yöntemiyle kaplanan kesici takımların başlıca özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Isıl işlem görmüş takım çeliklerine düşük sıcaklıklarda kaplama yapılabilmesi ve malzemelerde sertlik kaybının olmaması.
- Kaplama malzemelerinin taban malzemeye çok yüksek tutunma kuvvetleri ile bağlanması ve yüzeyden pul pul dökülmemesi.
- Sık dokulu kristal tabaka yapısının oluşması.
- Kompleks geometrik parçaların döner mekanizmalarla homojen özelliklerde kaplanabilmesi.
- Parçadaki köşe ve keskin uçların hasar almadan kaplanabilir olması.
- Takımların ve kalıpların parlatıldıktan sonra tekrar kaplanabilmesi (Mattox 1998).

### 2.1.2.PVD Kaplama Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Çizelge 2.2 PVD kaplamalarının sınıflandırılması.



#### 2.1.2.1. İyon ile Kaplama Yöntemi

PVD kaplama yöntemlerinden birisi iyon kaplama yöntemidir. Bu yöntemde taban malzemenin yüzeyine belli aralıklarla bombardıman yapılarak atomik boyutlardaki parçacıkların yüzeyde biriktirilmesi ile iyon kaplama gerçekleştirilir. Malzeme yüzeyi ile film arasında yüksek adezyon kuvveti istenilen kaplamalarda bu yöntem tercih edilir. Bu yöntemin üstünlüklerinden birisi, yüzeyde film tabakası oluşmadan önce film ve taban malzeme ara tabakasının oluşturulması ile adezyon yönünden avantaj sağlar. Diğer bir avantajı ise malzeme yüzeyinde meydana gelen yüksek sıcaklık sayesinde taban malzemenin yüzeyine doğru bir enerji akışı aktarıldığından malzemenin ısıtılmadan kimyasal reaksiyona girmesi sağlanmış olur (Mattox 1998).

### 2.1.2.2. Sıçratma ile Kaplama Yöntemi

Bu kaplama tekniği, hedeften koparılan atomların taban malzeme üzerine dışarıdan bir enerji alınarak büyütülmesi esasına dayanır. Kaplama sırasında reaksiyona girmeyen inert gazlar kullanılır. İnerit gaz olarak ise yaygın bir şekilde Ar gazı kullanılır (R F Bunshah 1980). Bu yöntemde sistem, negatif d.c. veya r.f. potansiyelli hedef malzeme ve taban malzeme tutucusunun olduğu vakum etkisinde bir ortamdan oluşmaktadır. Vakum ortamındaki sistem basıncı yaklaşık  $10^{-3} - 10^{-2}$  mbar seviyelerindedir. Hedef malzemelere 2-3 kV'lık potansiyel uygulanır. Bu sayede yüksek enerjili atomlar koparılmış olur. Bu şekilde hedef malzemedan atom koparılmasına sıçratma denilmektedir. Hedef malzemedan koparılan bu atomlar taban malzeme yüzeyinde istenilen ince filmi oluştururlar (Arnell and Kelly 1999).

### 2.1.2.3. Buharlaştırma ile Kaplama Yöntemi

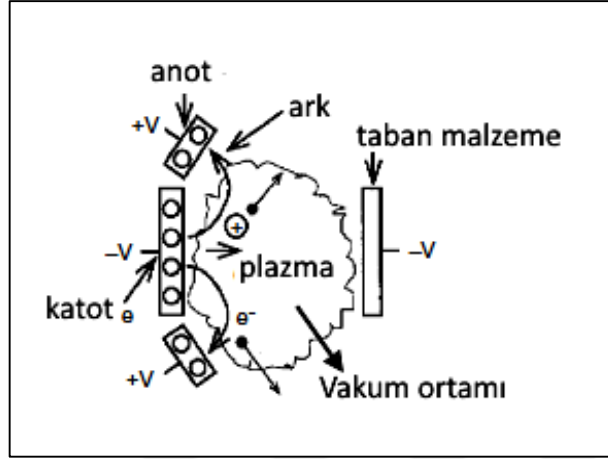
Buharlaştırma ile kaplama yöntemi, kaplama yapılacak malzeme, ısı etkisi ile atomların buharlaştırılıp, hedef malzeme yüzeyinde biriktirilmesi işlemidir. Bu yöntemde de ortam vakum etkisi altında olmalıdır. Kaplama yapılacak malzemenin buharlaştırılması için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan bazıları, buharlaştırma yapılacak malzemenin direk direnç olarak bağlanması, elektrik arkı oluşturulması, indüksiyon ile ısıtma yapılması, elektron tabancası yardımı ile elektron ışını bombardımanı yapılması ve son olarak ise lazer ışını ile ısıtma yapılmasıdır (Tjong and Chen 2004).

#### 2.1.2.3.a. Katodik Ark Fiziksel Buhar Kaplama Yöntemi

Bu yöntemde hedef malzemenin buharlaştırılması ve iyonize olması amacıyla elektrik arkı kullanılmaktadır. Vakum bölmesinde, hedef malzeme katot olarak, kaplama yapılacak taban malzemedan anot görevi görmektedir. Uygulanan düşük voltaj (10-40 V) ve yüksek akım ile (30-300 A) katot üzerinde ark meydana getirilir. Hedef malzeme yüzeyinde meydana gelen yüksek sıcaklıklar (2500°C), bu noktalar da ergime ve buharlaşmalara sebep olur. Bu yöntemde, iyonlaştırma miktarının yüksek olması, istenilen saflıkta kaplamanın yapılabilmesi, kaplamanın taban malzeme üzerine biriktirme hızının yüksek olması ve düşük taban malzeme sıcaklıklarında da iyi adezyon sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Bu yöntemin en büyük dezavantajı ise



biriktirme sırasında droplet oluşumu söz konusu olabilmektedir (Smallman and Ngan 2008; Sönmezoğlu vd. 2012).



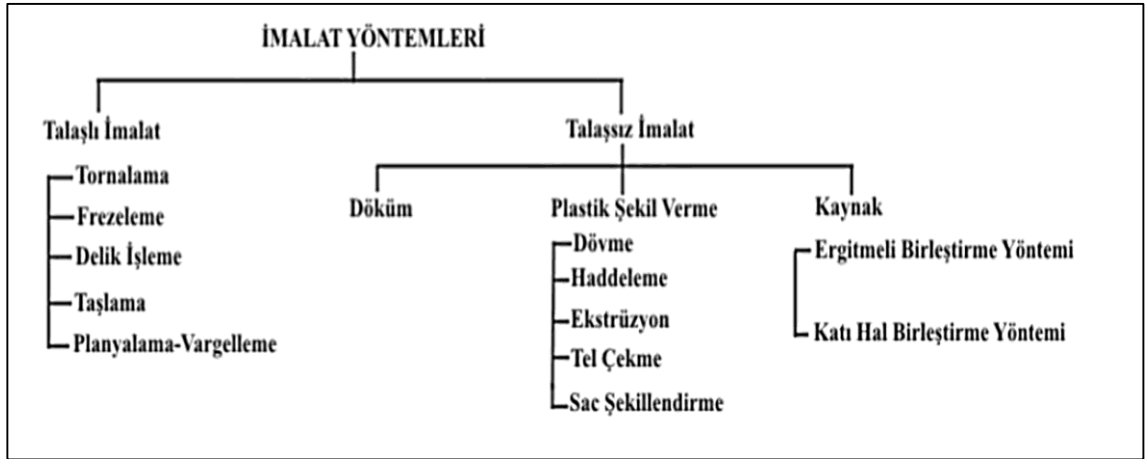
**Şekil 2.1** Şematik katodik ark PVD sistemi (Mattox 2010).

Katodik ark buharlaştırma tekniğinin ilk ticari uygulaması, azot plazmasında titanyumun ark ile buharlaştırılması ile düşük sıcaklıkta üretilen TiN kaplamalardır. İki tip katodik ark sistemi vardır. Bunlar darbeli ve sürekli katodik ark sistemleridir. Darbeli sistemlerde ark bir kondansatör kullanılarak, tekrarlı bir şekilde başlatılıp ve sonlandırılır. Darbeli ark ile hedef malzemenin darbeler arasında soğuma avantajı bulunmaktadır. Bu sistemin dezavantajı ise, kaplama birikme hızının düşmesidir. Sürekli ark sistemi ise kontrollü ya da rastgele olmak üzere ikiye ayrılır. Rastgele ark sisteminin en büyük dezavantajı, bazı uygulamalarda kaplamanın kalitesini etkileyen dropletlerin oluşumudur (Bunshah 1994).

### 2.2. İmalat Yöntemleri

İmalatın amacı ham madde halinde bulunan bir malzemeyi istenilen bir şekle dönüştürmek veya bir özellik kazandırmaktır. İmalat, güç kullanarak ilkel yöntemlerle veya makinalarla yapılabilir. İmalatın hedefi olan ürün, üretim araçları ile gerçekleştirilebilir. İmalat yöntemleri genel başlıklar altında şu şekilde sınıflandırılabilir:

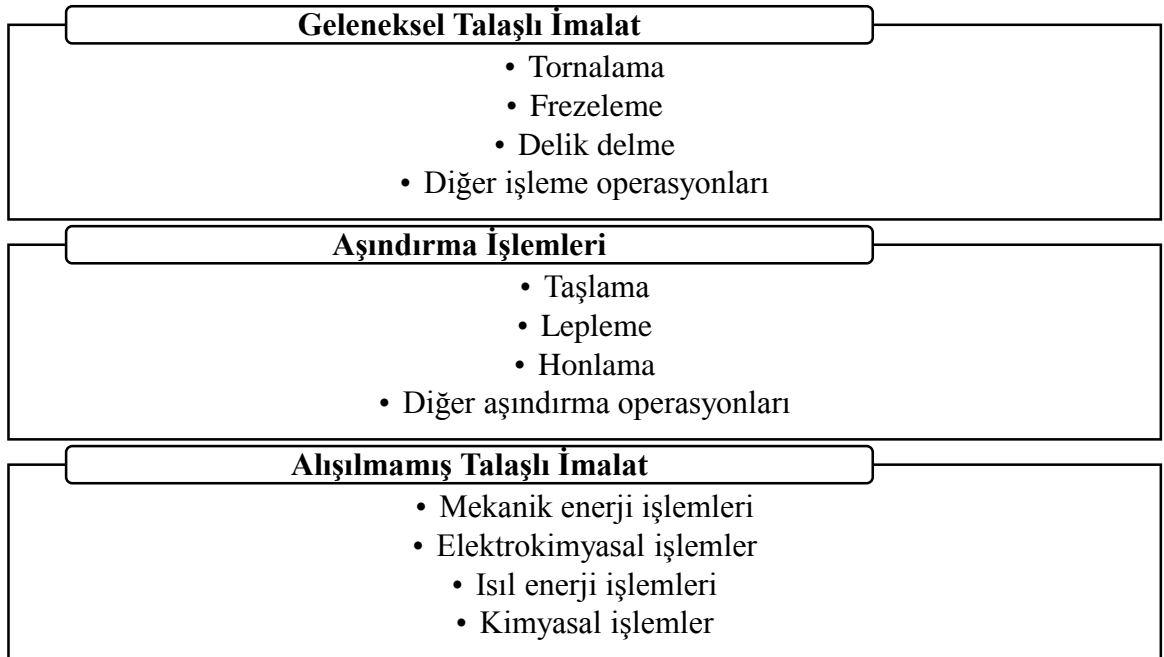
**Çizelge 2.3** İmalat Yöntemleri Sınıflandırılması.



### 2.2.1. Talaşlı İmalat Yöntemi

Malzeme uzaklaştırma işlemleri, fazla malzemenin bir iş parçasından kaldırılarak hedef geometrisinin elde edildiği imalat yöntemleridir. Bu imalat yöntemlerinin en önemli kolu olan ve sanayide yaygın kullanılan geleneksel talaşlı imalat işlemlerinde sert ve keskin bir kesici takım kullanılarak malzemenin mekanik olarak kesilmesi ile hedef parça elde edilir. Malzeme uzaklaştırma işlemleri Çizelge 2.4'te genel başlıkları ile verilmiştir.

**Çizelge 2.4** Malzeme uzaklaştırma işlemleri.



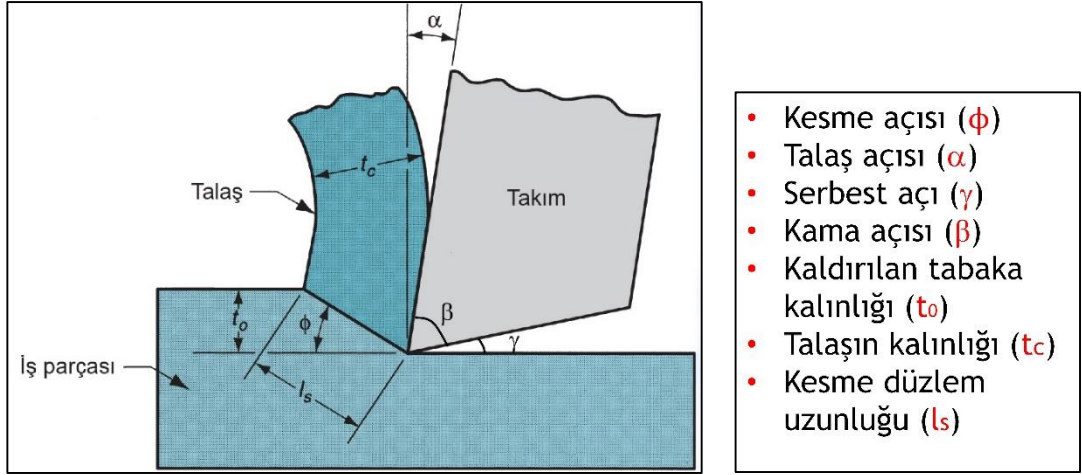
Talaşlı imalat en önemli ve temel imalat işlemlerinden biridir. Talaşlı imalatı çeşitli imalat yöntemlerinden üstün kılan sebepler aşağıda sıralanmıştır:

- İşlenecek parça malzemesinin çeşitliliği
- Parça şekillerinde ve geometrik özelliklerdeki çeşitlilik
- Yüksek boyutsal doğruluk
- Yüksek yüzey kalitesi

Talaşlı imalatın bu üstünlüklerine rağmen, birçok imalat yöntemi ile karşılaştırıldığında bir takım dezavantajları da mevcuttur. Bunlardan en önemlileri, talaş kaldırma işleminin doğası gereği atık malzeme oluşumu ve uzun işlem süreleri gerektirmesidir. Atık malzeme oluşumunu azaltmak için stok (kütük) parça ölçülerini mümkün mertebe hedef parça ölçülerine yakın hale getirmek bir çözüm olarak değerlendirilebilir. Talaşlı imalatta uzun işlem sürelerinin azaltılabilmesi için de bazı yaklaşımlar son dönemde öne çıkmaktadır. Yüksek hızda yapılan talaşlı imalat işlemleri ve akıllı imalat işlemleri bu duruma örnek verilebilir.

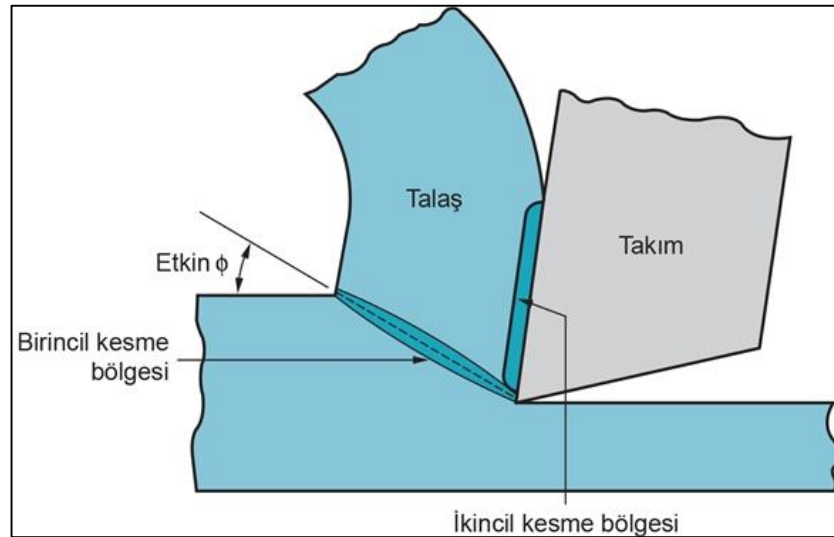
### 2.2.1.1. Talaş Olumunun Teorisi

Talaş kaldırma (metal kesme) olayını bilimsel olarak incelemek için tüm takımları temsil eden bir takım modeli oluşturulmuştur. Kesme ucundan (ağzından) oluşan bu takım ve talaş kaldırma modeline, Ortogonal kesme modeli denir. Gerçekte talaşlı imalat üç boyutludur. Ancak ortogonal kesme modeli analizde aktif rol oynayan iki boyuta sahiptir. 2 boyutlu ortogonal kesme modeli ve üzerindeki önemli geometrik büyüklükler Şekil 2.2’de verilmiştir.



**Şekil 2.2** 2 boyutlu ortogonal kesme modeli ve modelde yer alan önemli geometrik büyüklükler (Groover 2014).

Talaş oluşumu esnasında meydana gelen kesme bölgeleri Şekil 2.3'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, Ortogonal kesme modeline göre iki tane deformasyon bölgesi oluşmaktadır. Birincil (primer) kesme bölgesi, iş parçası yüzeyi ile  $\phi$  açısı yapan düzlem boyunca kayma (kesme) deformasyonu ile talaşın oluştuğu bölgedir. İkincil (sekonder) kesme bölgesi ise oluşan talaş ile kesici takım arasında sürtünmeden kaynaklanan deformasyon bölgesidir.



**Şekil 2.3** Ortogonal kesme modelinde deformasyon bölgelerinin gösterimi (Groover, 2014).

### 2.2.1.2. Kesici Takım Teknolojisi

Talaşlı imalatta kullanılan kesici takımların işlevini yerine getirememesinin sebepleri, kesici takımlarda bulunması gereken üç temel özelliğin tanımlanmasını sağlamaktadır. Bu özellikler, tokluk, sıcak (kızıl) sertlik ve aşınma direncidir. Yaygın olarak kullanılan kesici takım malzemeleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Az C'lu, Düşük Alaşımli ve Yüksek Hız (HSS) Çelikleri
- Döküm Kobalt Alaşımları
- Sinterlenmiş Karbürler, Sermetler, Kaplanmış Karbürler
- Seramikler
- Sentetik Elmaslar ve Kübik Bor Nitrürler

### 2.3. Sinterlenmiş Karbür Kesici Takımlar

Sinterlenmiş karbür takımlar toz metalürjisi ile üretilen Co'nun bağlayıcı olarak kullanıldığı WC içeren sert takımlardır. Diğer karbür türleri içeren (TiC, TaC) sinterlenmiş karbür takımlar da mevcuttur. İlk sinterlenmiş karbür takım Co-WC içeriğinde üretilmiştir. Ancak yapılan çalışmalarda bu takım ile çelik işlendiğinde takımın aşırı krater aşınması olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun sebebinin, çelik ile WC yapısındaki C arasında yüksek kimyasal ilgi nedeni ile meydana gelen difüzyon neticesinde olduğu tespit edilmiştir. Daha sonraki çalışmalarda WC-Co yapısına TiC ve TaC katılması ile krater aşınmasını iyileştirdiği tespit edilmiştir. Karbür takımlar, demir dışı kesme işlemleri için kullanılanlar ve çelik kesme işlemleri için kullanılan takımlar olmak üzere iki genel gruba ayrılır. Her iki grup takımın genel özellikleri ise; yüksek basınç mukavemeti ve kızıl sertlik, yüksek aşınma direnci, ısı iletkenlik ve elastisite modülüdür. Ancak bu takımların toklukları HSS çeliklerin tokluğundan oldukça düşüktür.

### 2.4. Takım Ömrü ve Aşınması

Talaşlı imalat operasyonları kesme takımları kullanılarak gerçekleştirilir. Talaşlı imalat sırasında oluşan yüksek kuvvetler ve sıcaklıklar, kesici takımlar için zararlı ortamlar oluşturur. Eğer kesme kuvveti çok yüksek değerlere ulaşır takım kırılır. Diğer yandan kesme sıcaklığı artarsa, takım malzemesi yumuşar ve görevini yerine getiremez. Eğer takımın kırılmaya ve yumuşamaya neden olan yüksek kesme kuvveti ve sıcaklık

artışı olmaz ise kesici takım sürekli bir doğal aşınmaya uğrar ve kesme işlemini gerçekleştiremez hale gelir (Groover 2014).

Talaşlı imalat esnasında takım-talaş ve takım-parça ara yüzeyleri arasında aşınmaya sebep olan mekanizmalar aşağıda belirtilmiştir.

- Kazıma (Abrazif Aşınma)
- Yapışma (Adezif Aşınma)
- Difüzyon (Yayınım)
- Kimyasal reaksiyonlar
- Plastik deformasyon

Takım ömrü, takımın kesme işleminde kullanılabilceği etkin süre olarak tanımlanır. Takım ömrünü belirlemenin bir yolu takımı artık kullanılamaz duruma gelene kadar kullanma olarak görülebilir. Ancak bu durum parçanın yüzey kalitesinde problemler yaratacağı için önerilmez. Alternatif olarak, takımdaki aşınmanın belirli bir seviyeye ulaşması, takım ömrünü belirlemek için bir kriter olarak seçilebilir. Takım önceden belirlenen bir aşınma seviyesine ulaşıncaya değiştirilir. Genellikle bu alternatif seviye yan yüzey aşınmasının belirli bir değere ulaşması olarak seçilir. Takım ömrünü belirlemek için Taylor takım ömür bağıntısı kullanılmaktadır. Bu bağıntı aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$VxT^n = C \quad (1)$$

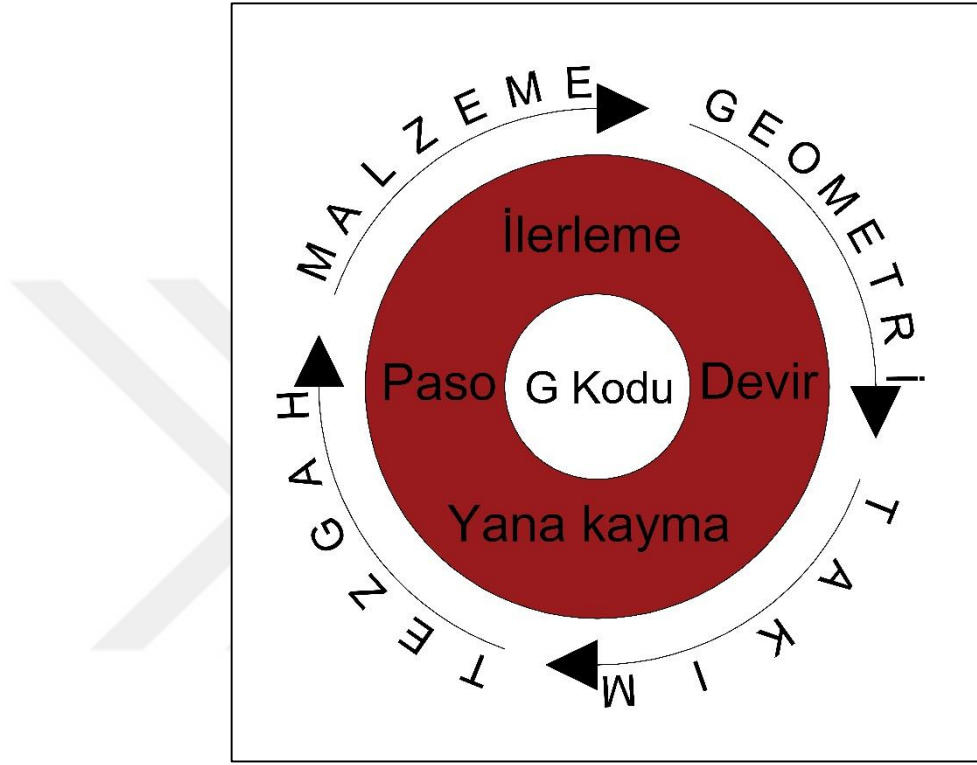
Bağıntıdaki  $T$  takım ömrünü (dak),  $V$  kesme hızını (m/dak),  $n$  ve  $C$  ifadeleri ise kesme parametreleri ve malzemeye bağlı sabitleri ifade etmektedir. Eşitlikten görüldüğü gibi, talaşlı imalat operasyonlarındaki en önemli parametre olan kesme hızı ( $V$ ) değeri arttıkça takım ömrü azalmaktadır. Ancak yüksek kesme hızı, ilgili operasyonun daha kısa sürede tamamlanmasını beraberinde getireceği için, imalat süreleri kısalmır.

### 2.5.iMachining Nedir?

Geleneksel CAM programlamada, belirlenen kesme parametreleri herhangi bir operasyon için işlem sonuna kadar belirlenen seviyede sabit kalır. Akıllı talaşlı imalat için geliştirilen CAM programlamada ise kesme parametreleri operasyon boyunca sabit kalmayıp, işlenen geometrinin kritik bölgelerinde değişken değerler olarak kullanılan kesici takımın daha az aşınacağı ve kısa süreli bir kesim sağlanmaktadır. iMachining, SolidCAM programı içerisinde yer alan akıllı talaşlı imalat modülüdür. iMachining modülündeki temel strateji, CAM programlamada tanımlanan temel parametreler olan

## 2. KURAMSAL TEMELLER

devir, ilerleme, paso miktarı ve yana kayma değerlerinin, işlenecek geometri, talaş kaldırılacak malzemenin türü, kesici takım malzemesinin türü ve talaşlı imalatta kullanılacak takım tezgahının kapasitesine bağlı olarak belirlenmesidir (Şekil 2.4). Programa başlangıç verisi olarak girilen bu özelliklerden sonra, program seçilen geometri için hacimsel olarak kaldırılacak talaş miktarını hesaplamakta ve elde edilen bu değere göre yana kesme parametrelerini optimize etmektedir.



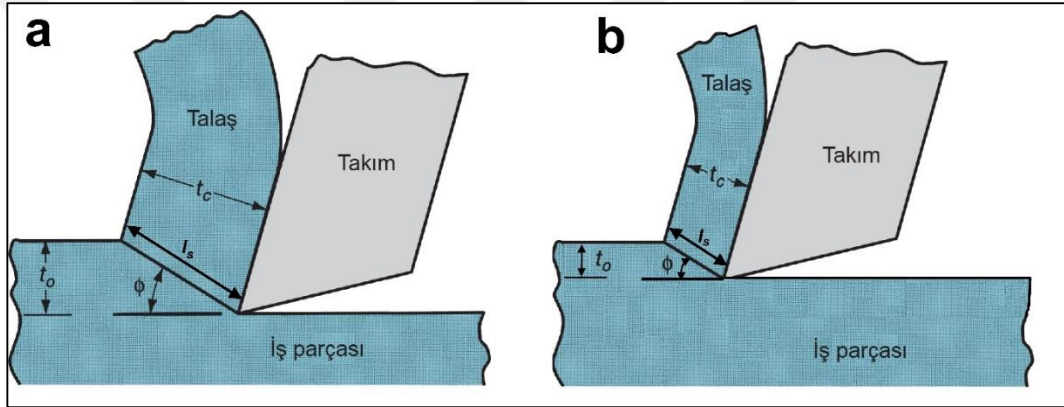
Şekil 2.4 CAM programlamada iMachining stratejisi.

Talaş kaldırma işlemi için CAM programı oluşturulurken programda tanımlanması gereken temel parametreler kesme hızı veya ana iş mili (spindle) devri ile ilerleme değerleridir. Söz konusu parametreler talaş kaldırılacak malzeme ve operasyonda kullanılacak kesici takımın malzemesinin türü ile yakından ilişkilidir. Etkili bir talaş kaldırma işlemi yapılabilmesi için bu değerlerin doğru olarak belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu değerler kişisel tecrübeler ışığında deneme-yanılma metodu ile belirlenebileceği gibi, takım üreticisi firma tarafından gerekli testler yapılarak hazırlanan kesici takım kataloglarından da seçim yapılabilir. iMachining modülünde ise program içerisinde oluşturulan kesici takım ve işlenecek malzeme için oluşturulan kütüphaneden malzeme seçimi yapılmak suretiyle, program devir ve ilerleme değerlerini belirler. Ayrıca

## 2. KURAMSAL TEMELLER

seçilen bu değerler geleneksel CAM programlamada olduğu gibi operasyon boyunca sabit kalmayıp, işlenen geometrinin kritik bölgelerinde değişken değerler alır.

Takım seçilen geometri için bir miktar yana kayar ve ilerleme hareketi yaparak talaş kaldırır. Yana kayma miktarı artarsa buna bağlı olarak talaş hacmi artar. Talaş hacminin artması ise kesici takıma gelen kuvvetin artması anlamına gelir. Bu durum ortogonal kesme modeli üzerinde de görülebilir (Şekil 2.5). Kesme kuvveti ( $F_s$ ) iş parçasının kesme mukavemeti ( $\tau$ ) ve kesme düzlem alanının ( $A_s$ ) ile çarpılması ile elde edilir. Kesme düzlem alanı ise kesme düzlem uzunluğu ( $l_s$ ) ve iş parçası genişliğinin ( $w$ ) çarpılması ile elde edilir. Kesme kuvvetinin azaltılabilmesi için kesme düzlem alanının azaltılması dolayısı ile kesme düzlem uzunluğunun azaltılması gerekir. Bu durum ise yana kayma miktarının azaltılması ile elde edilir.



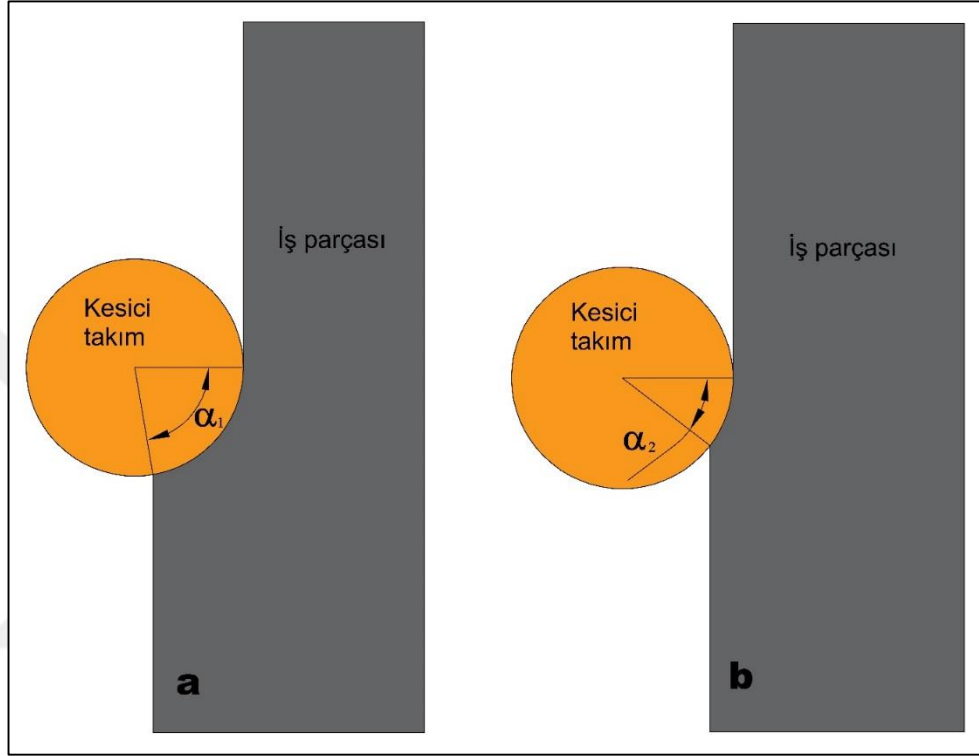
**Şekil 2.5** Ortogonal kesme modeli üzerinde kesme düzlem uzunluğu ve alanının değişimi (a) Yüksek kesme düzlem alanı (b) Düşük kesme düzlem alanı (Groover 2014).

Standart/geleneksel talaş kaldırma işlemlerinde yana kayma değerleri yaklaşık olarak kullanılan kesici takım çapının % 30-50 aralığında sabit bir değer olarak seçilir (Şekil 2.6.a). Standart takım yollarında bu yana kayma değerleri çok yüksek kesme/kavrama açılarının oluşmasına sebep olur. Kesme/kavrama açılarının yüksek olması durumunda ise takıma gelen kuvvetler artarak takımın kırılmasına sebep olur. Takıma gelen kuvvetlerin azaltılması için Z pasolarının azaltılması gerekir ve bu durumda işleme süreleri oldukça fazla zaman alır. Ayrıca seçilen bu yana kayma değeri geometriye bağlı olmaksızın tüm talaş kaldırma işlemi boyunca sabit olarak alınır. iMachining modülünde ise genellikle Z pasoları yüksek tutularak yana kayma değerleri düşük değerler için optimize edilir (Şekil 2.6.b). Program tarafından yapılan bu optimizasyon işlemi değişken olarak gerçekleştirilmektedir. Yani işlenecek geometrinin tüm



## 2. KURAMSAL TEMELLER

bölgelerinde aynı yana kayma değerini kullanmaksızın takım üzerine daha fazla kuvvet gelecek bölgelerde yana kayma değerlerini azaltarak etkili bir talaşlı imalat operasyonuna izin vermektedir. Dolayısı ile bu yöntemle yapılan talaşlı imalat operasyonlarında hem işleme süreleri önemli oranda azalır hem de parmak frezelerdeki helis boyunun büyük bir kısmı kullanılarak takımın hedeflenen homojen aşınma meydana getirilmiş olur.



**Şekil 2.6** Yana kayma değerlerine bağlı olarak kesme/kavrama açılarının gösterimi (a) Standart işleme, (b) iMachining işleme.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Bu tez çalışmasında taban malzeme olarak tungsten karbür (WC) kullanılmıştır. Taban malzeme üzerine İnan Coting (İstanbul) firması tarafından katodik ark fiziksel buhar kaplama (KAFBK) yöntemi ile TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN kaplamalar büyütülmüştür. Çalışmada kullanılan kaplama parametreleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Yapılan kaplamaların yapısal, mekanik ve tribolojik karakterizasyonu, 12x12x5 mm boyutlarında prizmatik deney numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların gerçek çalışma performanslarının belirlenmesi için deney numunelerinin haricinde aynı zamanda 12 mm çaplı karbür parmak frezelere de kaplama işlemi uygulanmıştır. Kaplama işlemi uygulanmış kesici takımların görüntüsü Şekil 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1** Kaplama parametreleri.

Parametreler	Değerler
Bias (V)	100
Katot amperi (A)	100
Basınç (mbar )	3,0E-02
Sıcaklık (°C)	450



**Şekil 3.1** İşlemsiz ve kaplanmış kesici takımlar.

#### 3.2. XRD Analizleri

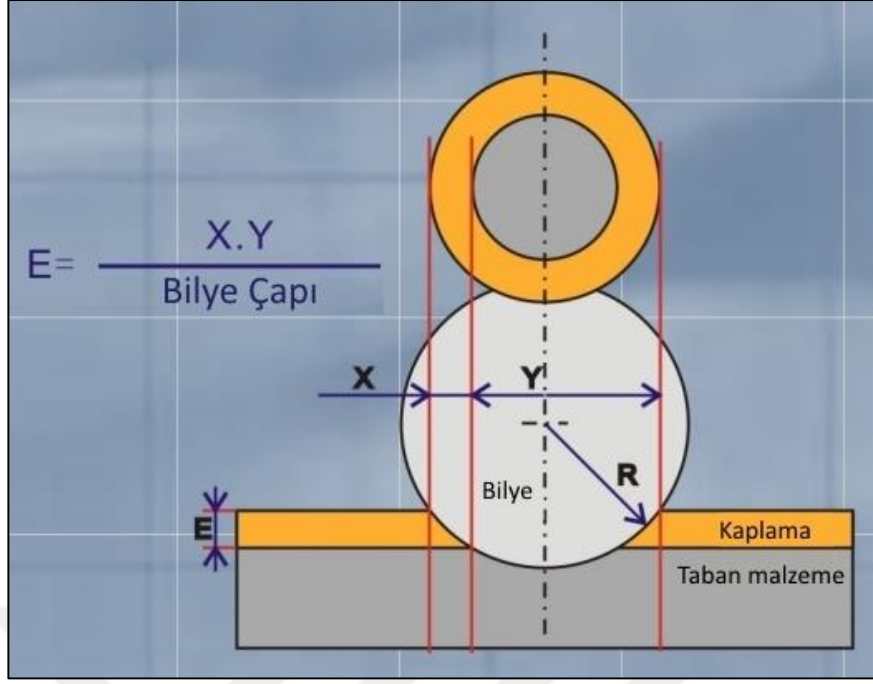
Kaplanmış malzeme yüzeyinde oluşan fazlar  $\lambda=1.5405 \text{ \AA}$  dalga boyuna sahip Cu- $K\alpha$  radyasyonu kullanılarak GNR-Explorer XRD cihazı vasıtasıyla belirlenmiştir (Şekil 3.2). Elde edilen sonuçlar JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) pik listeleri ile karşılaştırılarak oluşan fazlar tespit edilmiştir.



Şekil 3.2 X-Işını kırınım ölçer (XRD).

#### 3.3. Kaplama Kalınlığı Analizleri

WC taban malzeme üzerine büyütülen TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN kaplamaların kalınlıkları Calotest yöntemi ile belirlenmiştir (Şekil 3.3). Batıcı uç olarak 20 mm çaplı bilya kullanılmış ve oluşan izler üzerinde optik mikroskopla gerekli ölçümler yapılarak film kalınlıkları şekil üzerinde verilen eşitlik yardımı ile hesaplanmıştır.



Şekil 3.3 Calotest yöntemi (Anonymous, 2018).

#### 3.4. Mikro Sertlik Ölçümleri

Numunelerin mikro sertlik değerlerini belirlemek için Şekil 3.4’de resmi verilen SHIMADZU HMV-G20 mikro sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçümler, Vickers yöntemi ile 25 gram yük altında ve 10 saniye bekleme süresi ile numunelerin farklı noktalarından beşer ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4 Mikrosertlik cihazı.

#### 3.5. Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri için Şekil 3.5'te verilen Bruker-UMT (Bruker Universal Mechanical Tester) tribometre test cihazı ile kullanılmıştır. Aşınma testlerinde kullanılan parametreler Çizelge 3.2'de verilmiştir. İşlemsiz ve kaplanmış numunelerin aşınma oranları aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\text{Aşınma Oranı (mm}^3\text{/Nm)} = \frac{\text{Aşındırılan Hacim (mm}^3\text{)}}{\text{Uygulanan Yük (N). Aşınma Mesafesi (m)}}$$

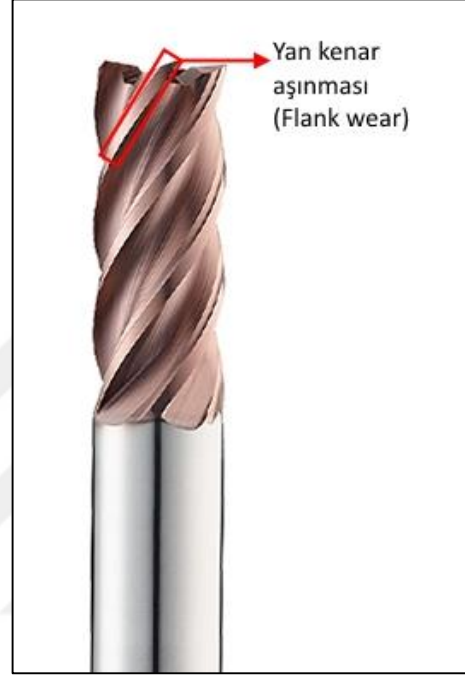
Çizelge 3.2 Aşınma Parametreleri.

Parametreler	Değerler
Test türü	İleri-geri (Reciprocating)
Uygulanan yük (N)	30
Toplam aşınma stroku (mm)	8
Aşındırma hızı (mm/s)	8
Süre (s)	3600
Karşı bilya malzemesi	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Sıcaklık (°C)	Oda sıcaklığı (23±2)
Ortam	Kuru şartlar



Şekil 3.5 Tribometre test cihazı.

İşlemsiz ve kaplanmış kesici takımların gerçek çalışma performanslarının belirlenmesi için gerçekleştirilen yüksek hızda frezeleme işlemi sonrası, kullanılan kesici takımlar üzerinde yan kenar aşınma genişlikleri ölçülmüştür (Şekil 3.6). Yani takım ömrü kriteri olarak yan kenar aşınma miktarı alınmıştır. Ayrıca takımların kesme işlemi öncesi ve sonrası hassas terazi ile ağırlıkları ölçülerek frezeleme işlemi sonrası takımlarda meydana gelen kütle kaybı belirlenmiştir.



**Şekil 3.6** Parmak freze üzerinde yan kenar aşınma bölgesi.

#### 3.6. Çizik Testi

Kaplamaların taban malzemeye olan adezyonunu belirlemek için gerçekleştirilen çizik testleri (scratch test) için Şekil 3.5'te verilen Bruker-UMT (Bruker Universal Mechanical Tester) tribometre test cihazı kullanılmıştır. Kritik yük değerleri, 0.2 mm uç yarıçaplı ve 120° konik açılı elmas Rockwell C batıcı uçla, 100 N/dakika yükleme oranında 10 mm/dakika kayma hızında belirlenmiştir. Test sonrası oluşan çizik izlerine ait optik mikroskop görüntüleri alınarak, izin farklı bölgelerine ait görüntüler birleştirilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri üzerinde, film hasarının oluşmaya başladığı ve filmin tamamen kalktığı bölgeler belirlenerek kritik yük değerleri elde edilmiştir.

#### 3.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

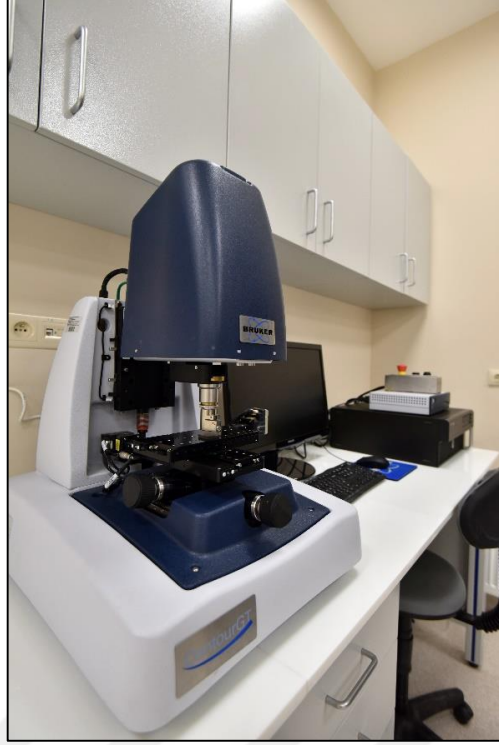
İşlemsiz ve kaplanmış deney numunelerinin aşınma izleri ve aynı şekilde işlemsiz ve kaplanmış parmak frezelerin yüksek hızlı kesme işleminden sonra takım üzerinde oluşan yan kenar aşınma genişliklerini ve aşınma mekanizmalarını tespit etmek için FEI QUANTA-FEG 250 markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Kullanılan cihazın resmi Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7 Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

#### 3.8. 3D Yüzey Profilometre Analizleri

Aşınma deneyleri sonrası deney numunelerinin aşınma hacminin hesaplanması ve yüksek hızlı frezeleme işleminde kullanılan kesici takımların iş parçası üzerinde meydana getirdiği yüzey pürüzlülüğü değerlerinin tespiti için Şekil 3.8’de resmi verilen Bruker Contour GT markalı 3D profilometre cihazı kullanılmıştır. Aşınma hacmi hesaplanırken aşınma izinin homojen olduğu varsayılarak numunenin üzerindeki aşınma izinin herhangi bir yerinden iz kesit alanı bulunmuştur. Bulunan kesit alanı aşınma izinin uzunluğu ile çarpılarak aşınma hacmi elde edilmiştir.



Şekil 3.8 3D Profilometre cihazı.

#### 3.9. SolidCAM iMachining Programlama ve Yüksek Hızlı Frezeleme İşlemi

Bu tez çalışmasında yüksek hızlı frezeleme işlemi için Şekil 3.9’da resmi verilen Haas-VF2 üç eksenli CNC dik işleme merkezi kullanılmıştır. İş parçası (stok model) olarak son dönemde kullanımı yaygınlaşan, sertliği 35HRC olan 40CrMnNiMo8-6-4 plastik enjeksiyon kalıp çeliği (impax çeliği) kullanılmış olup, kimyasal bileşimi Çizelge 3.3’te verilmiştir. Kullanılan iş parçası prizmatik olup, ölçüleri 104x102x32 mm şeklindedir. CNC programlama SolidCAM-iMachining 2 eksen modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Programda tanımlanan stok ve hedef model Şekil 3.10’da verilmiştir.

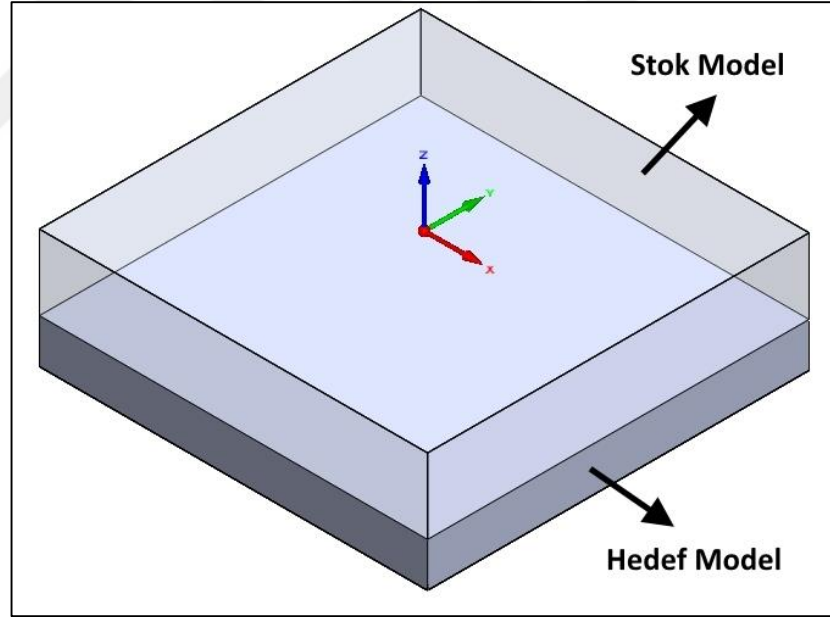
Çizelge 3.3 Plastik enjeksiyon kalıp çeliği kimyasal bileşimi.

Kimyasal Bileşim	C	Mn	Cr	Ni	Mo
% Dağılım	0,4	1,50	1,9	1	0,2





Şekil 3.9 CNC freze tezgâhı.

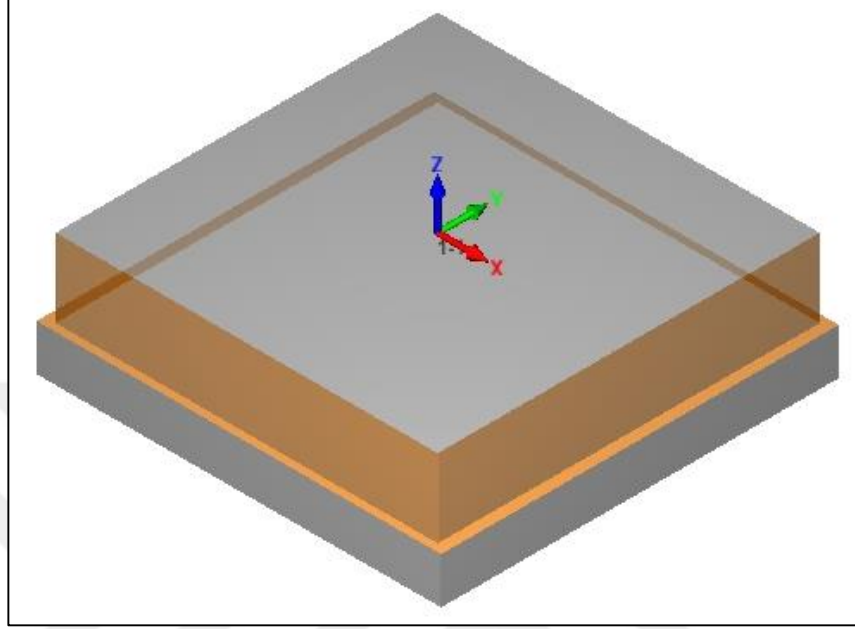


Şekil 3.10 CAM programlamada tanımlanan stok ve hedef modellerin gösterimi.

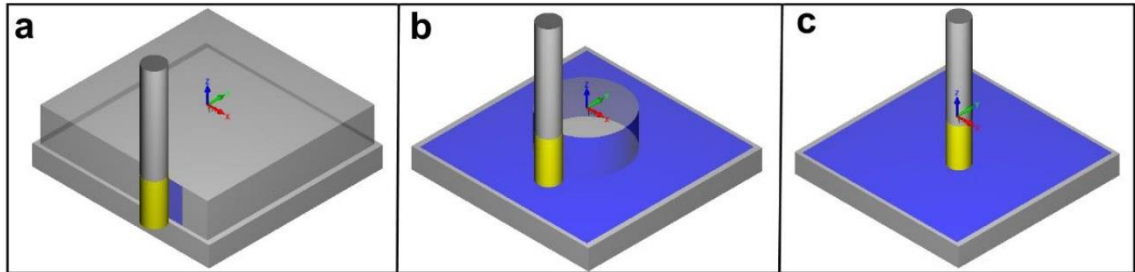
İş parçası sıfırı olarak kütük parçanın üst orta noktası alınmıştır. Kesici takım olarak 12 mm çaplı, 4 ağızlı ve helis açısı  $35^\circ$  olan tungsten karbür parmak frezeler kullanılmıştır. TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN seramik filmler ile kaplanmış ve kaplanmamış kesici takımların talaş kaldırma işleminde aşınma performanslarının doğru bir şekilde belirlenip karşılaştırılabilmesi için stok parçanın çevresinden ölçüm takımlarının dışındaki başka bir takım ile talaş alınarak stok parça ölçüleri 98x98x20 mm ölçülerine

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

indirilmiştir. Test edilecek takımların kullanılacağı parçanın nihai görüntüsü Şekil 3.11’de verilmiştir. Ayrıca SolidCAM işleme adımlarının simülasyon görüntüleri aşamalı olarak Şekil 3.12’de verilmiştir. İş parçasının yüzeyinden toplamda 200 cm<sup>3</sup> hacimde talaş kaldırılmıştır.



Şekil 3.11 Test edilecek takımların kullanılacağı parça.

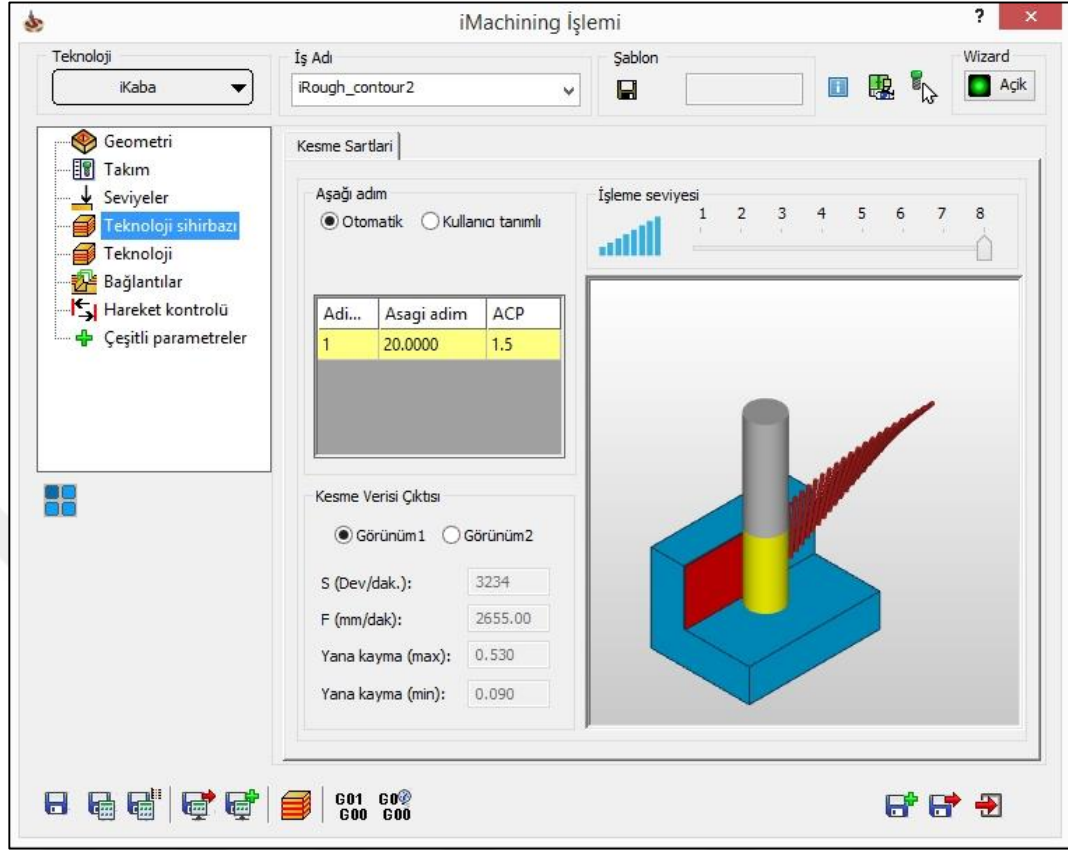


Şekil 3.12 SolidCAM işleme adımları.

CAM programlamada kullanılan iMachining işlemi için işleme seviyesi 8 olarak alınmış olup, bu değer operasyonda kullanılan tezgâhın tam güç kapasitesinde ve mümkün olan en yüksek kesme hızında parçayı kesmesi anlamına gelmektedir. Program tarafından optimize edilen kesme parametreleri Şekil 3.13’te görülmekte olup, ana iş mili devri maksimum 3234 dev/dak, X-Y düzlemindeki ilerleme maksimum 2655 mm/dak, ve yana kayma değerleri ise maksimum 0.53 ve minimum 0.09 mm değerleri arasında geometriye bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Söz konusu tüm kesme parametreleri, kaplanmış ve kaplanmamış takımların doğru bir şekilde karşılaştırılabilmesi için bütün

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

işlemlerde aynı değerlerde alınmıştır. Ayrıca simülasyon ve gerçek talaş kaldırma işlemlerinde operasyon süresi yaklaşık olarak 15 dakika olarak belirlenmiştir.

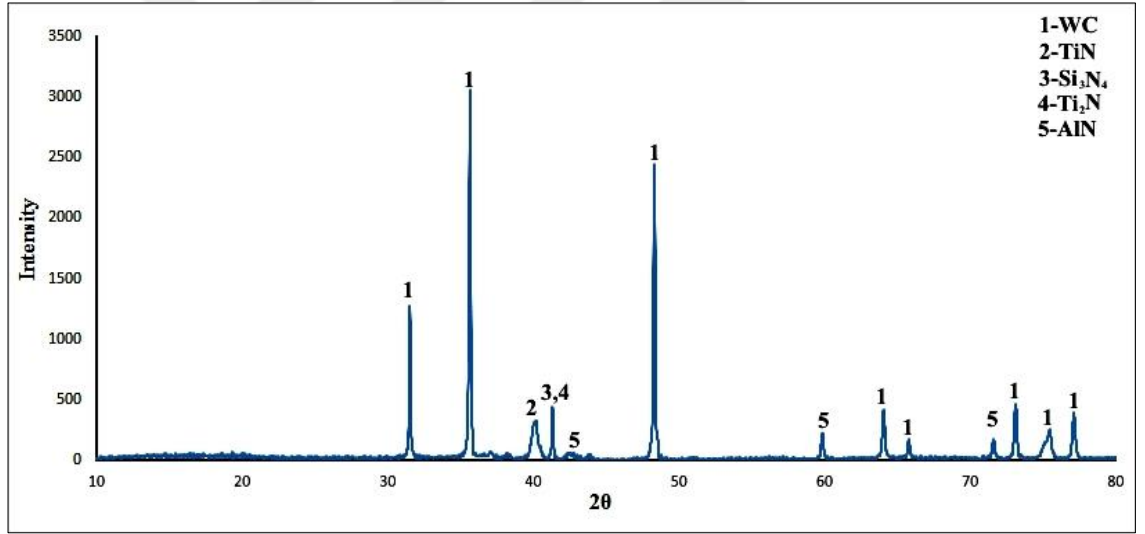


Şekil 3.13 iMachining işleminde kullanılan kesme parametreleri.

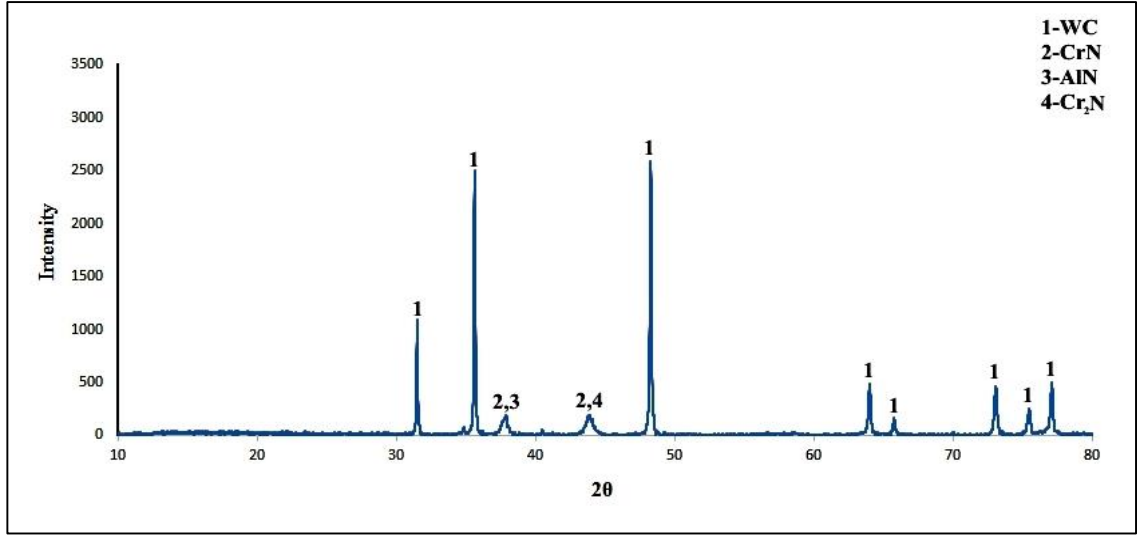
## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

## 4.1. XRD Analizleri

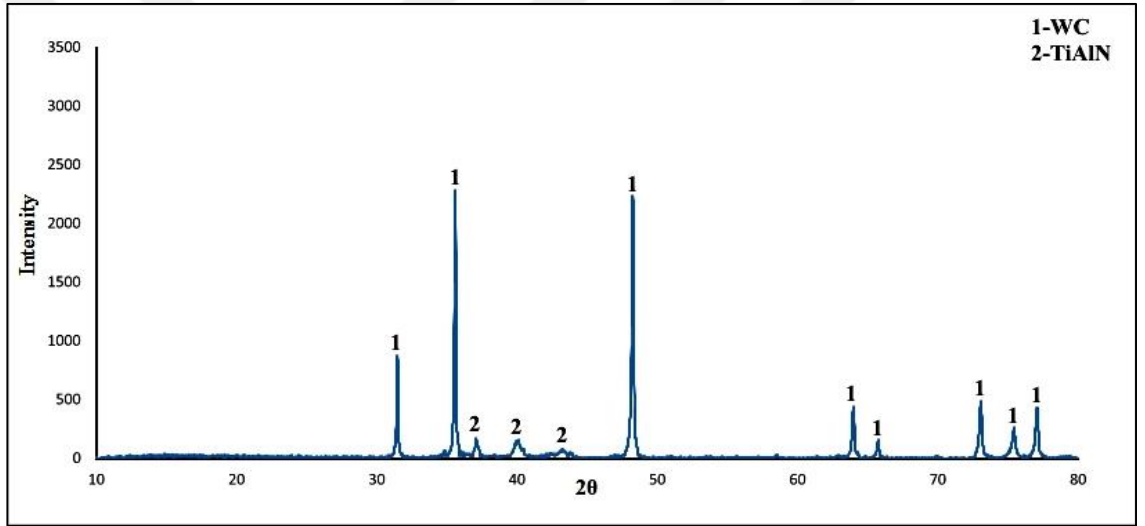
Katodik Ark PVD yöntemi ile WC taban malzeme üzerine kaplanmış TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN ince filmlerin XRD grafikleri Şekil 4.1-3'te verilmiştir. Kaplama kalınlıklarının nispeten düşük olması sebebiyle (1.2-1.4  $\mu\text{m}$ ) taban malzemedeki yansıma alınan WC piklerinin yoğun olduğu üç kaplama türü için de görülmektedir. WC taban malzeme üzerine TiAlSiN ince filmi ile kaplanan numunelerde TiN,  $\text{Ti}_2\text{N}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve AlN fazlarının oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.1). AlCrN film ile kaplanan numunede CrN,  $\text{Cr}_2\text{N}$  ve AlN fazlarının oluştuğu, TiAlN kaplanmış numunede ise beklenen fazın oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.2-3). Elde edilen fazlar ilgili kaplama türleri için oluşması muhtemel fazlar olup, kaplamaların WC taban malzeme üzerine başarılı bir şekilde büyütüldüğünü göstermektedir.



Şekil 4.1 TiAlSiN ile kaplanmış numunenin XRD grafiği.



Şekil 4.2 AlCrN ile kaplanmış numunenin XRD grafiği.



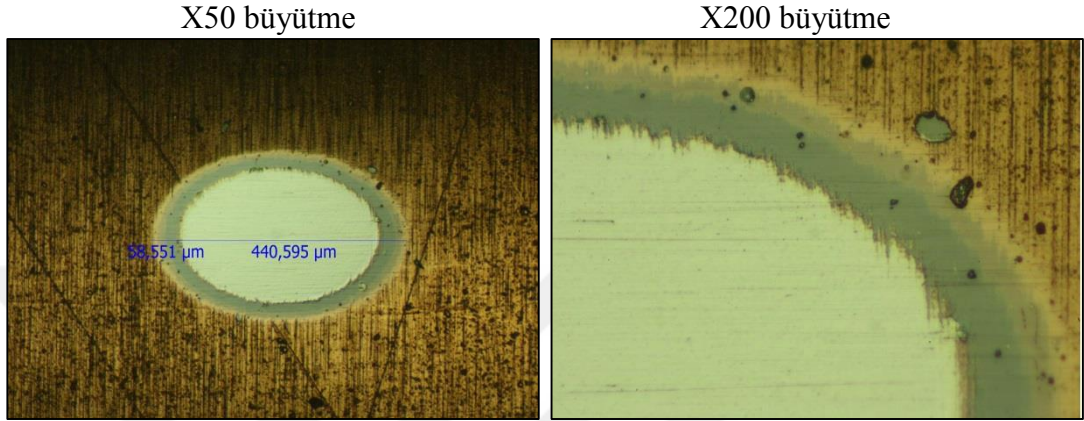
Şekil 4.3 TiAlN ile kaplanmış numunenin XRD grafiği.

#### 4.2. Calotest Analizleri

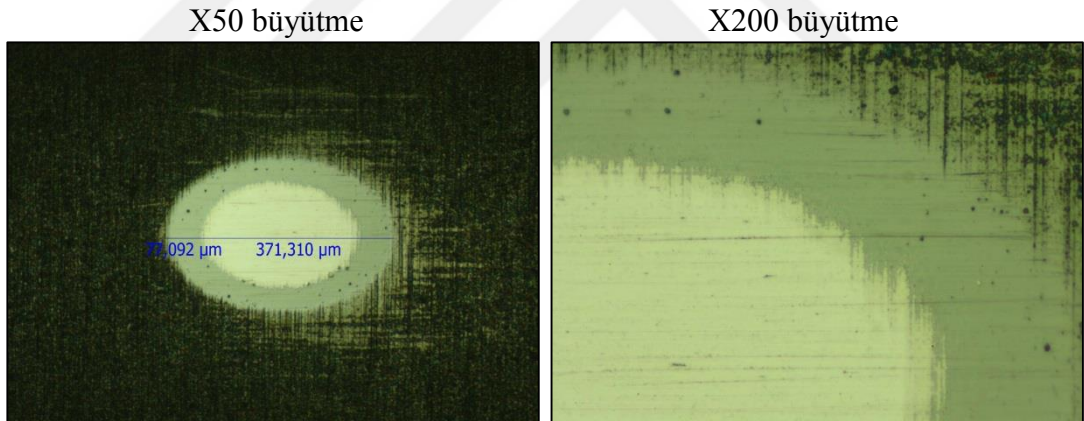
WC taban malzeme üzerine büyütülen TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN kaplamaların kalınlıkları Calotest yöntemine göre belirlenmiştir. Şekil 4.4-6'da verilen optik mikroskop görüntülerinden alınan geometrik büyüklükler kullanılarak elde edilen kaplama kalınlıkları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Kaplama kalınlıkları 1.2-1.4 µm aralığında ve değerler birbirine oldukça yakın olarak elde edilmiştir. Bu durum kaplamaların aşınma performanslarının doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi açısından büyük önem arz etmektedir.

Çizelge 4.1 Kaplama kalınlıkları.

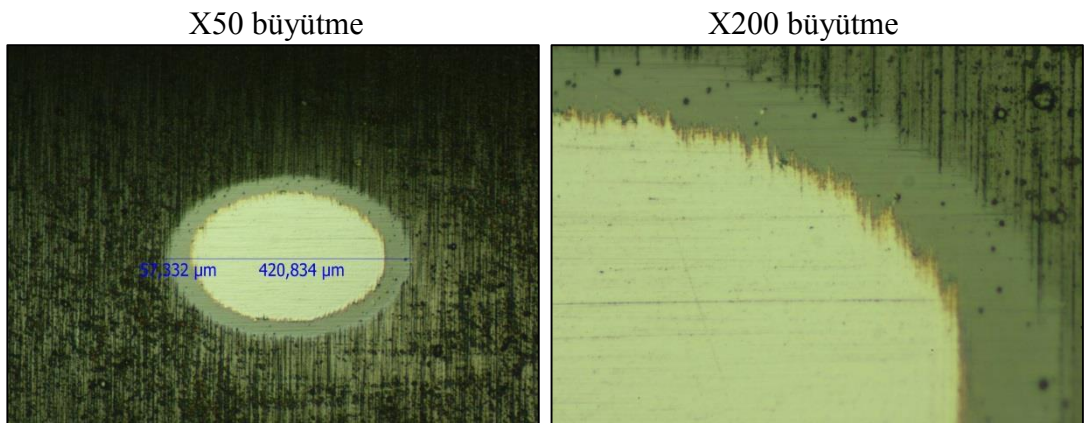
Kaplama Türü	Kaplama Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )
TiAlSiN	1,3
AlCrN	1,4
TiAlN	1,2



Şekil 4.4 TiAlSiN kaplamaya ait Calotest görüntüleri.



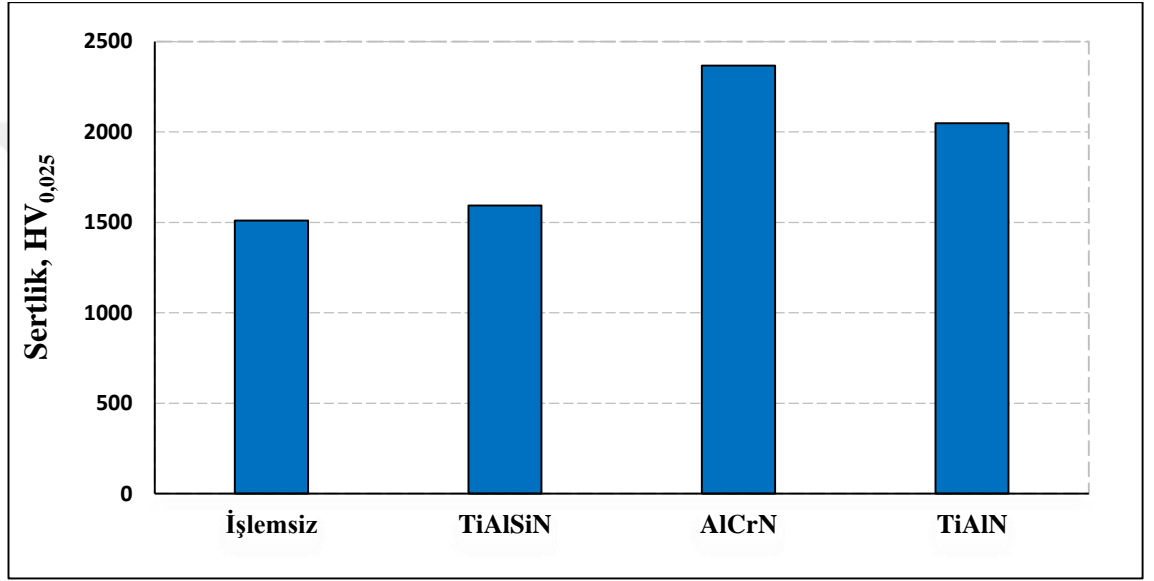
Şekil 4.5 AlCrN kaplamaya ait Calotest görüntüleri.



Şekil 4.6 TiAlN kaplamaya ait Calotest görüntüleri.

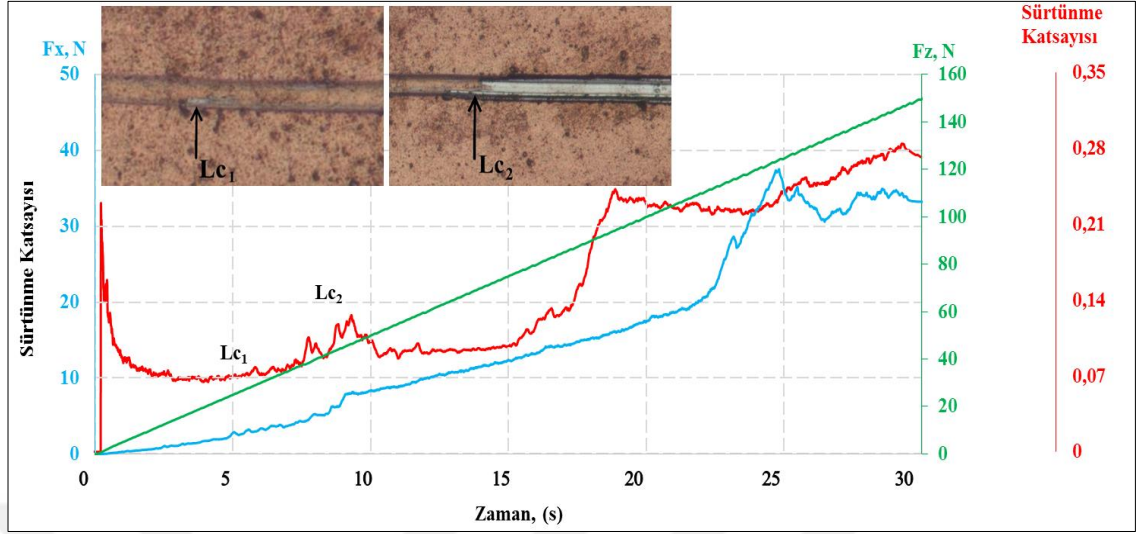
### 4.3. Mikro Sertlik Bulguları

WC taban malzeme üzerine büyütülen TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN ince filmlerin mikrosertlik değerleri Şekil 4.7' de verilmiştir. WC taban malzemenin sertlik değeri yaklaşık olarak 1500 HV olarak llmŐtir. Seramik film ile kaplanmış numuneler arasında en düşük sertlik değeri, TiAlSiN ile kaplanmış numune için elde edilmiştir. AlCrN ve TiAlN ince filmleri ile kaplanmış numunelerin sertlik değerlerinde ise taban malzemenin sertliğine oranla önemli bir artış sağlanmış olup, sertlik değerleri sırası ile 2400 ve 2100 HV olarak belirlenmiştir.

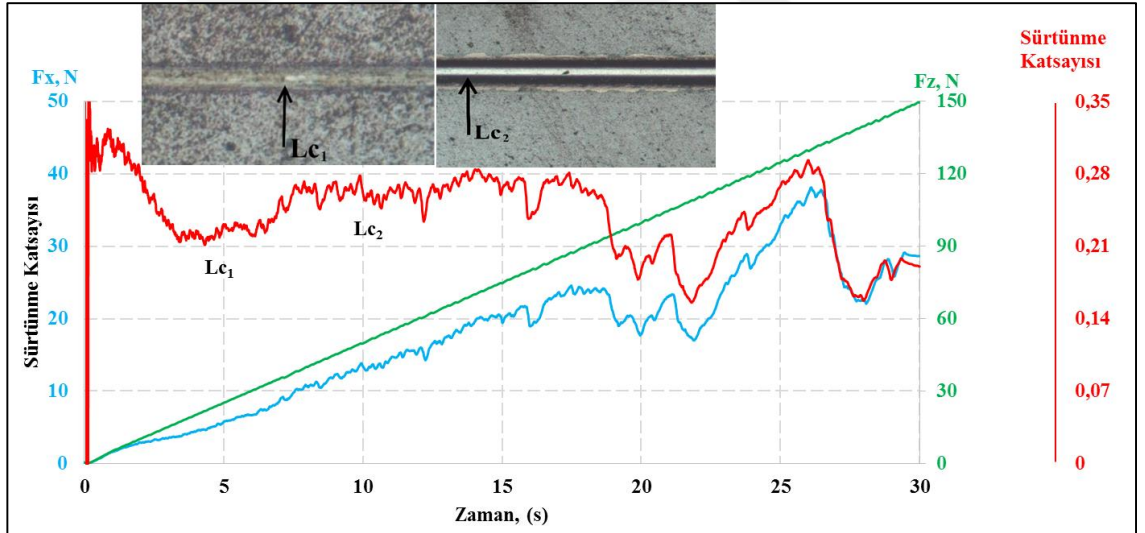


Şekil 4.7 İŞlemsiz, TiAlSiN, AlCrN, TiAlN kaplanmış numunelerin sertlik değerleri.

## 4.4. Çizik Testi Bulguları

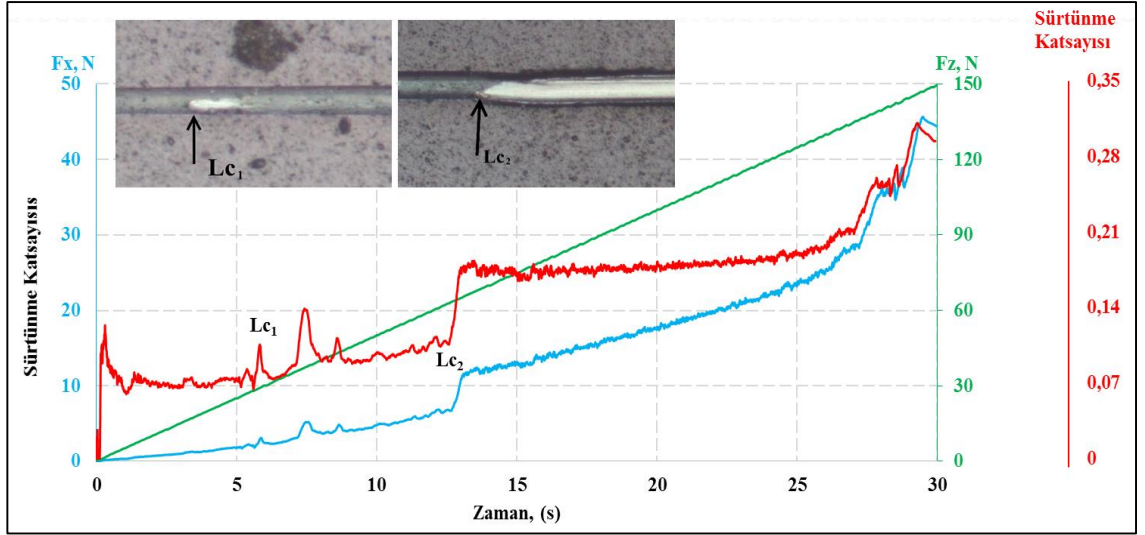


Şekil 4.8 TiAlSiN çizme testi esnasında uygulanan yük ile sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti arasındaki ilişki ile çizik izlerine ait optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 4.9 AlCrN çizme testi esnasında uygulanan yük ile sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti arasındaki ilişki ile çizik izlerine ait optik mikroskop görüntüleri.





**Şekil 4.10** TiAlN çizme testi esnasında uygulanan yük ile sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti arasındaki ilişki ile çizik izlerine ait optik mikroskop görüntüleri.

**Çizelge 4.2** Kaplanmış numunelere ait çizik testi kritik yük değerleri.

Kaplama Türü	Lc <sub>1</sub> (N)	Lc <sub>2</sub> (N)
TiAlSiN	20	40
AlCrN	25	50
TiAlN	30	65

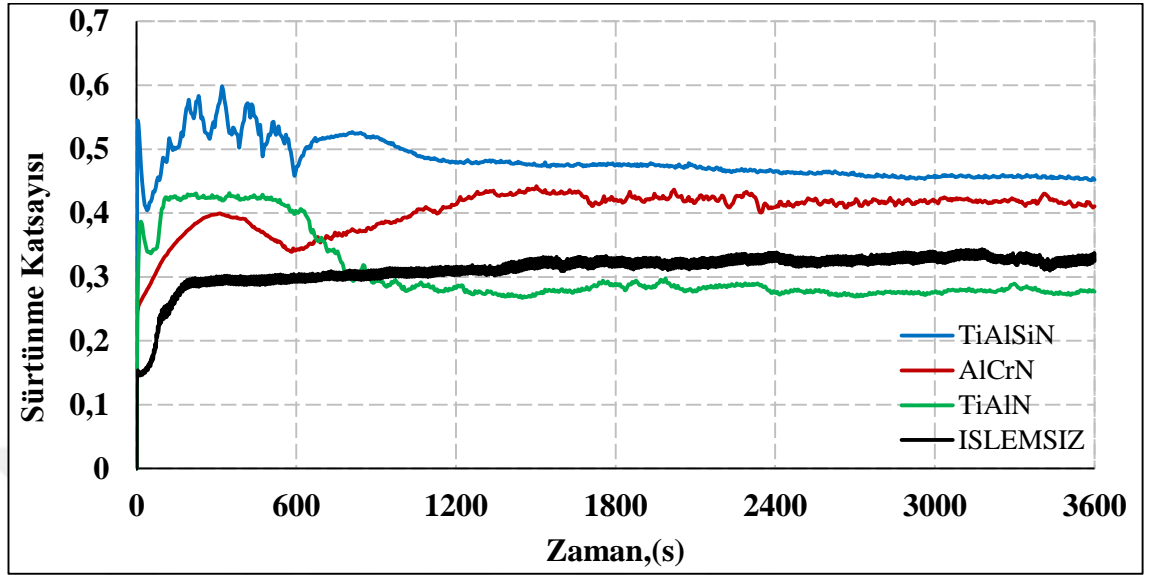
Seramik ince filmler ile kaplanmış numunelerin çizik testi sonrasında elde edilen kritik yük değerleri Çizelge 4.2’ de verilmiştir. Lc<sub>1</sub> kritik yükü, batıcı ucun kaplama üzerinde hasar başlangıcına sebep olduğu yük değeri olarak alınmıştır. Lc<sub>2</sub> kritik yük değeri ise kaplamanın taban malzemedan tamamen ayrıldığı yük değeri olarak alınmıştır. Şekil 4.8-10’ da çizme testi esnasında uygulanan yük ile sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti arasındaki ilişki ile çizik izlerine ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Kritik yük değerlerinin elde edildiği noktalarda hem sürtünme katsayısı hem de sürtünme kuvvetini temsil eden eğrilerdeki kırılmalar dikkati çekmektedir. Kritik yük değerlerinin tespiti için farklı noktalardan alınan optik mikroskop görüntüleri birleştirilerek çizik izinin tamamı üzerinde bir genel değerlendirme yapılmıştır.

TiAlSiN seramik filmi ile kaplanmış numunenin kritik yük değerleri diğer kaplamalara göre oldukça düşük olarak belirlenmiştir. AlCrN ve TiAlN kaplamaların kritik yük değerleri birbirine oldukça yakın olmakla beraber, en yüksek kritik yük değerleri TiAlN seramik filmi ile kaplanmış numune için elde edilmiştir. Özellikle TiAlN ve AlCrN kaplamaların kritik yük değerlerinin yüksek olması, bu iki kaplama türünün taban malzemeye adezyonunun oldukça iyi olduğunu göstermektedir. Çizme testi sonunda artan yükün etkisi ile meydana gelen plastik Şekil değişimi, kaplamalarda incelme ve yer yer delinmeye sebep olarak taban malzemeye ulaŐıldıęı görülmüŐtür. Kaplamalarda  $L_{c1}$  kritik yük değerinin elde edildiği ilk hasar sonrası, batıcı ucun temas kenarlarında pullanma (ploughing) ve kabuklanma (flaking) Şeklinde hasarlar meydana gelmiŐtir.



#### 4.5 Aşınma Deneyi Bulguları

##### 4.5.1. Sürtünme Katsayısı Bulguları



**Şekil 4.11** İşlemsiz, TiAlSiN, AlCrN, TiAlN kaplı numunelerin sürtünme katsayıları grafiği.

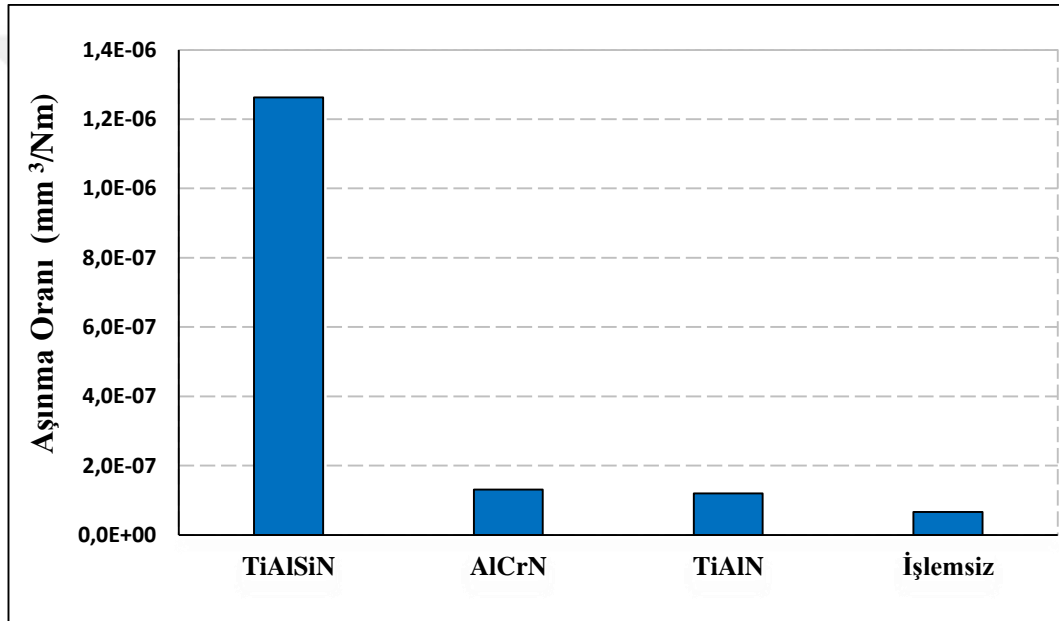
İşlemsiz ve farklı seramik filmler ile kaplanmış WC malzemenin sürtünme test sonuçları Şekil 4.11’de verilmiştir. Eğrilerin tamamında görüldüğü gibi aşınma testinin başlangıcında Hertziyan teması sebebiyle sürtünme katsayısı yüksek değerlere ulaşmakta, testin ileri safhalarında aşınan malzeme çifti yüzeylerinin birbirine alışması sonrası daha düşük ve kararlı bir davranış sergilemektedir. Ayrıca sürtünme katsayısı eğrileri incelendiğinde, değerlerde dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Bu durum, sert ince filmlerin parçalanarak abrazyon etkisi oluşturduğunu göstermektedir. En düşük sürtünme katsayısı değerleri işlemsiz ve TiAlN kaplanmış numuneler için elde edilmiştir. İşlemsiz numune için ortalama sürtünme katsayısı 0,3, TiAlN kaplanmış numune için 0,25, AlCrN kaplanmış numune için 0,4 ve TiAlSiN kaplanmış numune için ise 0,5 olarak belirlenmiştir.

##### 4.5.2. Aşınma Oranı ve Aşınma İzi SEM Görüntüleri

İşlemsiz ve farklı seramik filmler ile kaplanmış WC malzemenin aşınma oranları Şekil 4.12’de ve aşınma izi SEM görüntüleri Şekil 4.13’te verilmiştir. Aşınma testi sonrası elde edilen aşınma oranları incelendiğinde en yüksek aşınma oranının TiAlSiN kaplanmış numune için, en düşük aşınma oranının ise işlemsiz numune için elde edildiği görülmektedir. AlCrN ve TiAlN kaplanmış numunelerin aşınma oranları ise birbirine

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

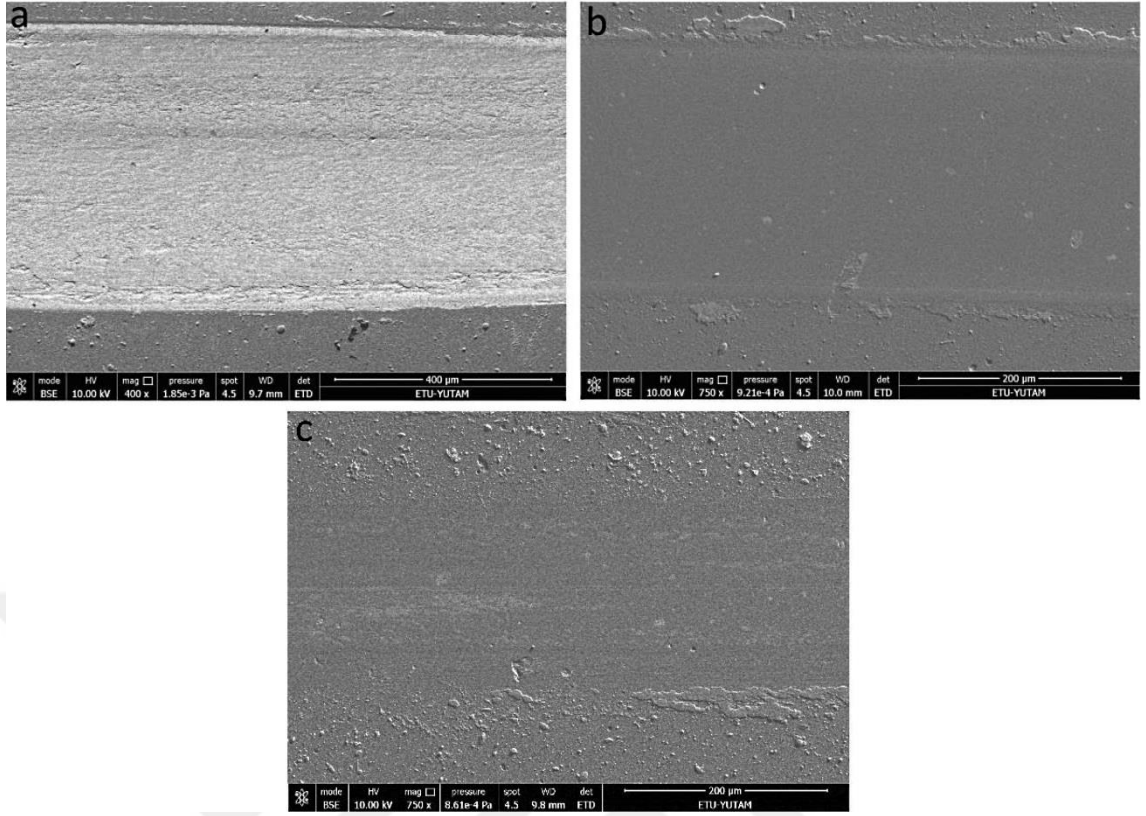
oldukça yakın olmakla beraber, işlemsiz numunenin aşınma oranı değerine benzer bir karakter sergilemiştir. TiAlSiN kaplamanın bu kadar yüksek aşınma oranı değerine sahip olması, çizik testi sonrası elde edilen adezyon değerleri ile yakından ilişkilidir. TiAlSiN kaplanmış numunelerin düşük kritik yük değerlerine sahip olması sebebiyle aşınma testi esnasında ince film kırılarak abrazif aşınmaya sebep olmuş ve aşınma hacminin artışı ile sonuçta aşınma oranı artmıştır. Yüksek adezyon değerlerinin elde edildiği AlCrN ve TiAlN kaplamalarda bu durumun, aşınma testinin çok daha geç bir zaman diliminde meydana geldiği değerlendirilmiştir. Bu sebeple AlCrN ve TiAlN kaplamaların aşınma oranları işlemsiz numuneye oldukça yakın olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.12 İşlemsiz, TiAlSiN, AlCrN, TiAlN kaplı numunelerin aşınma oranları grafiği.

Aşınma izi SEM görüntüleri incelendiğinde, en geniş aşınma izi aşınma oranı değerlerine de paralel olarak TiAlSiN kaplanmış numune için elde edilmiştir. Ayrıca bu numunede, aşınma testi sonrası düşük adezyon nedeniyle kaplamanın yüzeyden tamamen kalktığı ve taban malzemeye inildiği görülmektedir. AlCrN ve TiAlN kaplanmış numunelerin aşınma iz genişliklerinin birbirine oldukça yakın olduğu ve test sonrası taban malzemeye inilmediği tespit edilmiştir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.13 Aşınma izlerinin SEM görüntüleri (a) TiAlSiN, (b) AlCrN, (c) TiAlN.

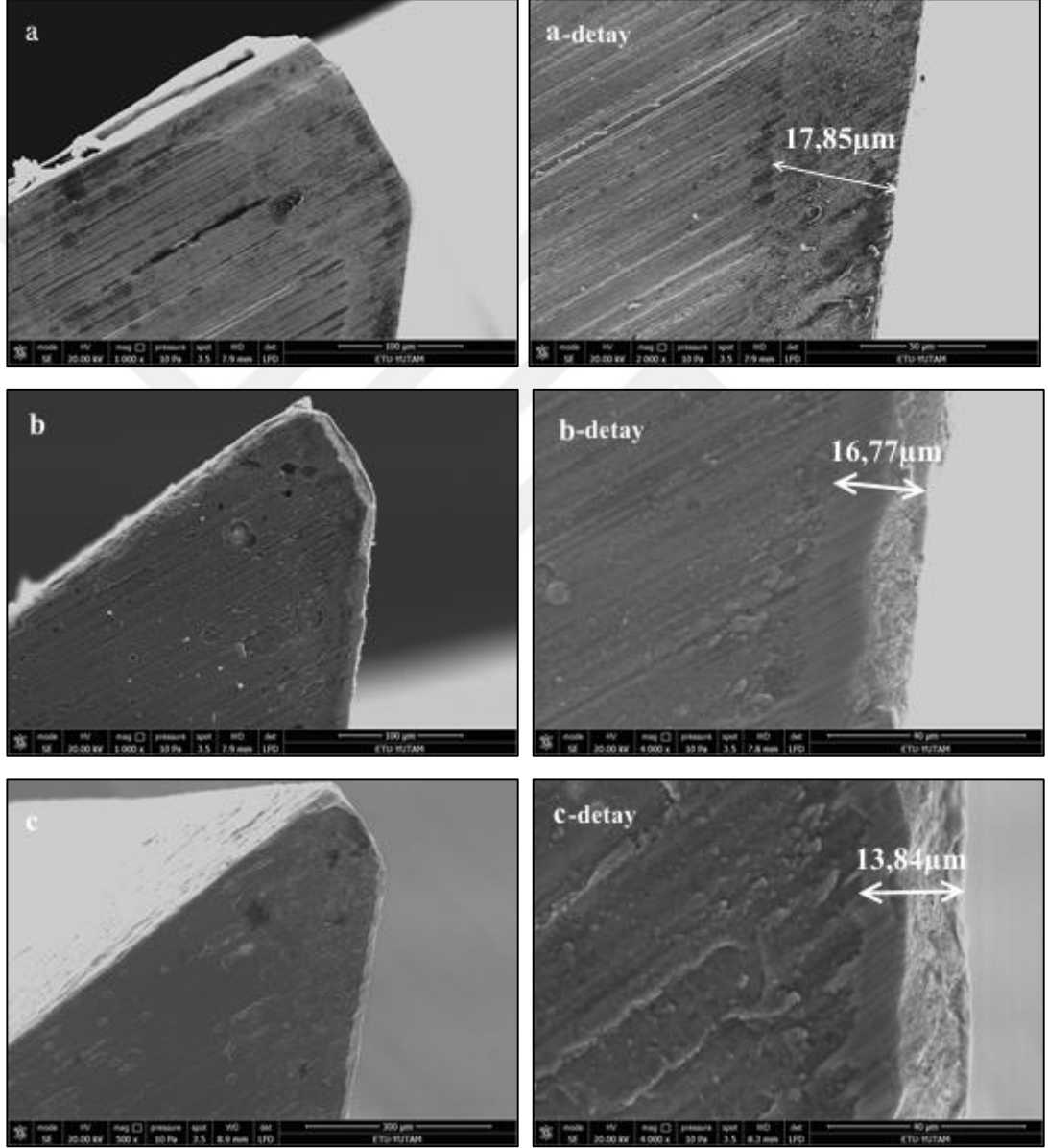
#### 4.6. Parmak Frezelerde Oluşan Aşınma Bulguları

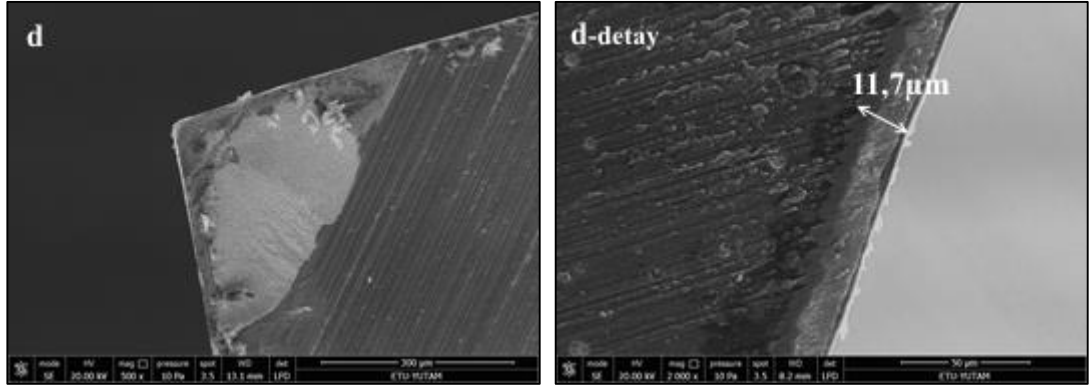
Üretimde takım ömrünü belirlemede birçok kriter kullanılmaktadır. Bunlar; kesme kenarının kırılma, sıcaklık bozulması ya da sürekli aşınma sonrası takımın kesme işlemini yapamaz hale gelerek tamamen bozulması, operasyon esnasında meydana gelen ses değişimi, talaş şeklinin değişmesi, iş parçasının yüzey kalitesinin kötüleşmesi, işlenen parça sayısı ve yan kenar aşınma (flank wear) miktarının belirli bir seviyeye ulaşmasıdır. Bu kriterler içerisinde en yaygın kullanılanı yan kenar aşınma miktarının belirlenmesi ve hedeflenen yan kenar aşınmasına ulaşıldığında takımın yenisi ile değiştirilmesidir.

Bu çalışmada işlemsiz ve kaplanmış karbür kesici takımların yüksek hızlı frezeleme işlemi sonrası aşınma performanslarının belirlenmesi için yan kenar aşınma genişliği referans alınmıştır. Tüm takımlar aynı kesme şartlarında test edilerek yan kenar aşınma genişlikleri SEM vasıtası ile ölçülmüş ve elde edilen değerler Şekil 4.14'te verilmiştir. Prizmatik aşınma test numunelerinde aşınma performansı açısından en iyi sonucu işlemsiz WC taban malzeme sergilemiş (Şekil 4.12) olmasına rağmen, gerçek

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

kesme koşullarında en düşük yan yüzey aşınma genişliği TiAlN seramik filmi ile kaplanmış kesici takım için elde edilmiştir. Adezyon değerlerinin yüksek ve birbirine yakın olduğu TiAlN ve AlCrN kaplamalar gerçek çalışma koşullarında da yakın sonuçlar sergilemiştir (4.14.c-d). Kuru şartlarda ve yüksek hızda gerçekleştirilen frezeleme işleminde oluşan sıcaklık sebebiyle işlemsiz karbür takım en düşük aşınma performansını göstermiştir.

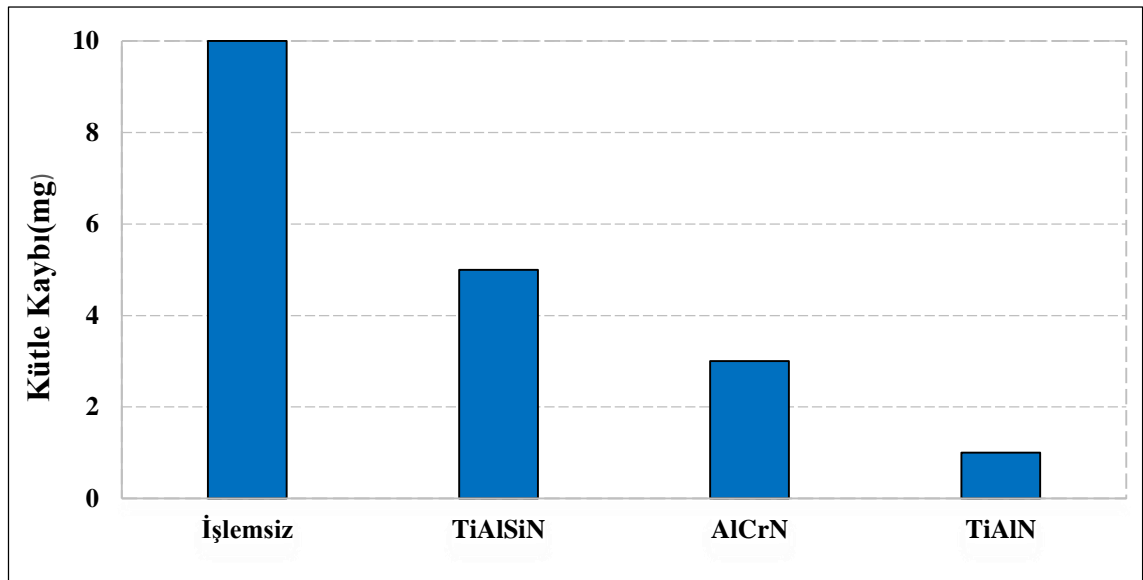




**Şekil 4.14** Kesici takımların yan kenar aşınma genişlikleri (a) İşlemsiz, (b) TiAlSiN, (c) AlCrN, (d) TiAlN.

#### 4.7. Parmak Frezelerdeki Kütle Kaybı Analizleri

İşlemsiz ve kaplanmış karbür takımlar yüksek hızlı frezeleme işlemi öncesi ve sonrası ultrasonik yıkama yapılarak hassas terazide tartılmıştır. Takımlardaki kütle kayıpları belirlenerek sonuçlar Şekil 4.15'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yan kenar aşınma genişliği değerleri ile uyumlu olup, en düşük kütle kaybı TiAlN seramik filmi ile kaplanmış kesici takım için elde edilmiştir.



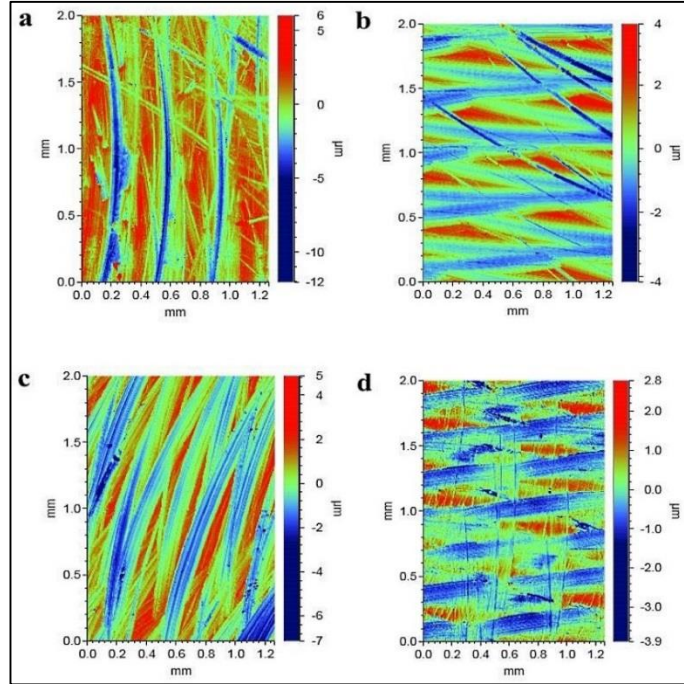
**Şekil 4.15** Karbür takımların ultrasonik yıkama öncesi ve sonrası kütle kayıplarının grafiksel gösterimi.

#### 4.8. 3D Yüzey Profilometre Analiz Sonuçları

İşlemsiz ve kaplanmış karbür takımlar ile yüksek hızlı frezeleme işlemi sonrası impax çeliği iş parçası yüzeyinden 3D optik profilometre yardımı ile yüzey pürüzlülüğü değerleri ( $S_a$ =Surface roughness average) alınmış olup sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri iş parçasının merkez bölgesinden alınmıştır. Impax çeliği iş parçası üzerinden alınan profilometre görüntüleri şekil 4.16'da verilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri TiAlN seramik filmi ile kaplanmış karbür kesici takımla frezelenmiş iş parçası yüzeyinden elde edilmiştir. Dolayısı ile hem aşınma performansı hem de iş parçası yüzey kalitesi açısından yapılan değerlendirmede TiAlN seramik filmi ile kaplanmış kesici takımın en üstün sonuçları verdiği tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.3.** İş parçasının frezeleme işlemi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri.

Karbür Takımlar	Yüzey Pürüzlülüğü ( $S_a - \mu\text{m}$ )
İşlemsiz	1.2
TiAlSiN	0.788
AlCrN	0.845
TiAlN	0.775



**Şekil 4.16** İş parçasının 3D yüzey görüntüleri (a) İşlemsiz (b) TiAlSiN, (c) AlCrN, (d) TiAlN



### 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

#### 5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, katodik ark fiziksel buhar kaplama yöntemi ile Tungsten Karbür (WC) taban malzeme üzerine TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN seramik filmleri büyütülerek, karbür malzemenin aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Kaplama işlemleri hem prizmatik test numunelerine hem de karbür parmak frezelere uygulanmıştır. Kaplamaların yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin karakterizasyonu, prizmatik test numuneleri üzerinde standart deney prosedürü uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların gerçek çalışma performanslarının belirlenmesi için işlemsiz ve kaplanmış karbür takımlar ile CNC dik işleme merkezinde impax çeliğinden imal edilmiş iş parçası, yüksek hızlı frezeleme işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan frezeleme işleminde, klasik yöntemlerle üretilen takım yollarının kullanılması yerine, son dönemde kullanılmaya başlayan ve akıllı imalat (intelligent machining) şeklinde nitelendirilen iMachining modülü ile takım yolları oluşturulmuştur. Çalışma sonrası üretilen kaplamaların aşınma performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- XRD sonuçlarına göre, katodik ark fiziksel buhar kaplama yöntemi ile Tungsten Karbür taban malzeme üzerine TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN seramik filmleri başarılı bir şekilde büyütülmüştür.
- Calotest sonuçlarına göre kaplama kalınlıkları TiAlSiN film için 1.4, AlCrN film için 1.3 ve TiAlN film için ise 1.2  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. Kaplama kalınlıklarının birbirine oldukça yakın olması, kaplamaların tribolojik özelliklerinin doğru bir şekilde karşılaştırılmasını sağlamıştır.
- İşlemsiz Tungsten Karbür malzemenin mikro sertliği 1500 HV olarak ölçülmüştür. Kaplama işlemleri sonrası sertlik değeri artarken, en yüksek sertlik değerleri AlCrN ve TiAlN ile kaplanmış numuneler için elde edilmiştir.
- Taban malzeme üzerine büyütülen filmlerin adezyonunu belirlemek için gerçekleştirilen çizik testleri sonrası en yüksek kritik yük değerleri TiAlN kaplama için elde edilmiştir.
- İşlemsiz ve farklı seramik filmler ile kaplanmış WC malzemenin sürtünme test sonuçlarına göre en düşük sürtünme katsayısı değerleri işlemsiz ve TiAlN kaplanmış numuneler için elde edilmiştir. İşlemsiz numune için ortalama

sürtünme katsayısı 0.3, TiAlN kaplanmış numune için 0.25, AlCrN kaplanmış numune için 0.4 ve TiAlSiN kaplanmış numune için ise 0.5 olarak belirlenmiştir.

- Aşınma testi sonrası elde edilen aşınma oranı değerlerine göre en yüksek aşınma oranı TiAlSiN kaplanmış numune için, en düşük aşınma oranı ise işlemsiz numune için elde edilmiştir.
- Prizmatik aşınma test numunelerinde aşınma performansı açısından en iyi sonucu işlemsiz WC taban malzeme sergilemiş olmasına rağmen, gerçek kesme koşullarında en düşük yan yüzey aşınma genişliği TiAlN seramik filmi ile kaplanmış kesici takım için elde edilmiştir. Kuru şartlarda ve yüksek hızda gerçekleştirilen frezeleme işleminde oluşan sıcaklık sebebiyle işlemsiz karbür takım düşük aşınma performansı göstermiştir.
- İşlemsiz ve kaplanmış karbür takımlar ile yüksek hızlı frezeleme işlemi sonrası impax çeliği iş parçası yüzeyinden alınan yüzey pürüzlüğü sonuçlarına göre, en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri TiAlN seramik filmi ile kaplanmış karbür kesici takımla frezelenmiş iş parçası yüzeyinden elde edilmiştir.

### 5.2. Öneriler

Yapılan bu tez çalışması sonrası, özellikle talaşlı imalatta yeni bir eğilim olan kuru şartlarda kesim ve takım yollarının üretilmek istenen geometriye özel olarak oluşturulduğu işleme stratejilerinde kullanılacak takımların sert seramik filmler ile kaplanmasının, takım ömrünün artırılmasında ve işlenen parçanın yüzey durumunun iyileştirilmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Özellikle uygulanan kaplamalar arasında en üstün mekanik ve tribolojik özellikler TiAlN kaplama işlemi sonrası elde edilmiştir.

Bu çalışma sonrası yapılacak diğer çalışmalar ile TiAlN kaplama farklı taban malzemeler üzerinde ve farklı kalınlıklarda üretilerek aşınma performansları incelenebilir. Ayrıca farklı iş parçası geometrilerine göre oluşturulmuş takım yolları ve değişken kesme parametreleri denenerek ilgili kaplama için en uygun kesme parametreleri belirlenebilir.

## KAYNAKLAR

- Anonymous, 2018. Web Sitesi: <https://www.tribotechnic.com/en/products/calotest>, Erişim Tarihi: 24.09.2018.
- Antonov, M., H. Afshari, J. Baronins, E. Adoberg, T. Raadik, ve I. Hussainova. 2018. The effect of temperature and sliding speed on friction and wear of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and ZrO<sub>2</sub> balls tested against AlCrN PVD coating.
- Avila, R. F., C. Godoy, A. M. Abrão, ve M. M. Lima. 2008. Topographic analysis of the crater wear on TiN, Ti(C,N) and (Ti,Al)N coated carbide tools. *Wear* 265 (1–2): 49–56.
- Bunshah, Rointan F. 2001. Handbook of Hard Coatings Deposition Technologies, Properties and Applications. Handbook of Hard Coatings Deposition Technologies, Properties and Applications.
- Bunshah, Rointan F. 1994. Handbook of Deposition Technologies and Applications Edited by.
- Cao, Fuyang, Paul Munroe, Zhifeng Zhou, ve Zonghan Xie. 2018. Mechanically robust TiAlSiN coatings prepared by pulsed-DC magnetron sputtering system: Scratch response and tribological performance. *Thin Solid Films* 645: 222–30.
- Castanho, J. M., ve M. T. Vieira. 2003. Effect of ductile layers in mechanical behaviour of TiAlN thin coatings. *Journal of Materials Processing Technology* 143–144 (1): 352–57.
- Chen, Li, Yong Du, S. Q. Wang, ve Jia Li. 2007. A comparative research on physical and mechanical properties of (Ti, Al)N and (Cr, Al)N PVD coatings with high Al content. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 25 (5–6): 400–404.
- Dobrzański, L. A., D. Pakuła, A. Křiž, M. Soković, ve J. Kopač. 2006. Tribological properties of the PVD and CVD coatings deposited onto the nitride tool ceramics. *Journal of Materials Processing Technology* 175 (1–3): 179–85.
- Dudukovi, Goran, ve Milutin Ogrizović. 2016. The Advantages of Intelligent Machining Using İmaching Technology.
- Faga, M. G., G. Gautier, R. Calzavarini, M. Perucca, E. Aimò, F. Cartasegna, ve L. Settineri. 2007. AlSiTiN nanocomposite coatings developed via Arc Cathodic

PVD: Evaluation of wear resistance via tribological analysis and high speed machining operations. *Wear* 263 (7–12 SPEC. ISS.): 1306–14.

Fox-Rabinovich, G. S., B. D. Beake, J. L. Endrino, S. C. Veldhuis, R. Parkinson, L. S. Shuster, ve M. S. Migranov. 2006. Effect of mechanical properties measured at room and elevated temperatures on the wear resistance of cutting tools with TiAlN and AlCrN coatings. *Surface and Coatings Technology* 200 (20–21): 5738–42.

Gong, Manfeng, Jian Chen, Xin Deng, ve Shanghua Wu. 2017. Sliding wear behavior of TiAlN and AlCrN coatings on a unique cemented carbide substrate. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 69: 209–14.

Groover, P.M. Yurdakul, M. İç T.Y. 2015. *Modern İmalatın Prensipleri*. Nobel Yayınevi, 1002, Ankara

Heinke, W, A Leyland, A Matthews, G Berg, C Friedrich, ve E Broszeit. 1995. Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell- C adhesion tests. *Thin Solid Films* 270: 431–38.

Kalss, W., A. Reiter, V. Derflinger, C. Gey, ve J. L. Endrino. 2006. Modern coatings in high performance cutting applications. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 24 (5): 399–404.

Kerkhofs, M., M. Van Stappen, Marc D’Olieslaeger, Carl Quaeyslaegers, ve L. M. Stals. 1994. The performance of (Ti ,Al) N-coated flowdrills. *Surface and Coatings Technolog* 68: 741–46.

Löffler, Frank H. W. 1994. Systematic approach to improve the performance of PVD coatings for tool applications. *Surface and Coatings Technology* 68/69: 729–40.

Mamaghanı, S. 2016. Frezeleme İşleminde Eş Yönlü ve Zıt Yönlü Talaş Kaldırmanın PVD Kaplanmış Sert Metal Uçlardaki Aşınma Türlerine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 149.

Man, B. Y., L. Guzman, A. Miotello, ve M. Adami. 2004. Microstructure, oxidation and H<sub>2</sub>-permeation resistance of TiAlN films deposited by DC magnetron sputtering technique. *Surface and Coatings Technology* 180–181: 9–14.

Mandev, Zeynep. 2018. Fiziksel Buhar Kaplama (PVD) ile Büyütülmüş TiN, CrN ve DLC Filmlerde Artık Gerilme-Adesyon İlişkisi. Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

- Mattox, D. M. 1998. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control, Society of Vacuum Coaters Albuquerque.
- Mattox, DM. 2010. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD). Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2037-5.00025-3>.
- Musil, J. 2000. Hard and superhard nanocomposite coatings. Surface and coatings technology 125 (1–3): 322–30.
- Nickel, J., A. N. Shuaib, B. S. Yilbas, ve S. M. Nizam. 2000. Evaluation of the wear of plasma-nitrided and TiN-coated HSS drills using conventional and Micro-PIXE techniques. Wear 239 (2): 155–67.
- Nordin, M, R Sundström, T I Selinder, ve S Hogmark. 2000. Wear and failure mechanisms of multilayered PVD TiN/TaN coated tools when milling austenitic stainless steel. Surface and coatings technology 133: 240–46.
- Parlinska-Wojtan, Magdalena. 2016. Oxygen diffusion in columnar TiAlSiN coatings investigated by electron microscopy. Thin Solid Films 616: 437–43.
- Philippon, D. Godinho, V. Nagy, P.M. Delplancke-Ogletree, M.P., Fernandez, A. 2011. Endurance of TiAlSiN coatings: Effect of Si and bias on wear and adhesion, Wear, 270, 541-549.
- Prengel, H. G., W. R. Pfouts, ve A. T. Santhanam. 1998. State of the art in hard coatings for carbide cutting tools. Surface and Coatings Technology 102 (3): 183–90.
- Santos, Sandro Cardoso, Wisley Falco Sales, Flávio José da Silva, Sinésio Domingues Franco, ve Marcio Bacci da Silva. 2004. Tribological characterisation of PVD coatings for cutting tools. Surface and coatings technology 184 (2–3): 141–48.
- Smallman, R. E., ve A. H.W. Ngan. 2008. Physical Metallurgy and Advanced Materials. Vasa, 650.
- Sproul, William D. 1996. Physical vapor deposition tool coatings. Surface and Coatings Technology 81 (1): 1–7.
- Sultana, Nazma, Md Raihan Quader, Md Jakaria, ve Md Habibur Rahman. 2016. SolidCAM iMachining (2D): A Simulation Study of a Spur Gear Machining and G-code Generation for CNC Machine. Int. J. Mech. Eng. Autom 3 (1): 1–9.

- Sundgren, J.-E. 1985. Structure and properties of TiN coatings. *Thin Solid Films* 128 (1): 21–44.
- Tanaka, Y, N Ichimiya, Y Onishi, ve Y Yamada. 2001. Structure and properties of Al–Ti–Si–N coatings prepared by the cathodic arc ion plating method for high speed cutting applications. *Surface and Coatings Technology* 146–147: 215–21.
- Teer, Dennis G. 1996. Magnetron sputter ion plating. Google Patents.
- Tillmann, W., Dildrop M., 2017. Influence of Si content on mechanical and tribological properties of TiAlSiN PVD coatings at elevated temperatures, *Surface and coatings technology*, 321, 448-454.
- Totik, Y., I. Efeoğlu, M. Gavgali, ve R. Sadeler. 2001. An investigation of the relationship between heat treatment and microstructure in (TiAlV)N and (TiAl)N ceramic films. *Materials Characterization* 47 (1): 55–60.
- Wei, Ronghua, John J. Vajo, Jesse N. Matossian, ve Michael N. Gardos. 2002. Aspects of plasma-enhanced magnetron-sputtered deposition of hard coatings on cutting tools. *Surface and Coatings Technology* 158–159: 465–72.
- Yıldız, F. 2011. Nitrürleşmiş AISI 4140 çeliğinin Plazma Ortamında Yaşlanma Davranışı. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Yıldız, F. 2005. Farklı Yüzey İşlemlerinin Metalik İmplant Malzemeler Üzerine Etkileri. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Zeghni, A. E., ve M. S.J. Hashmi. 2004. The effect of coating and nitriding on the wear behaviour of tool steels. *Journal of Materials Processing Technology* 155–156 (1–3): 1918–22.
- Zhou, Z., W. M. Rainforth, Q. Luo, P. Eh Hovsepian, J. J. Ojeda, ve M. E. Romero-Gonzalez. 2010. Wear and friction of TiAlN/VN coatings against Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in air at room and elevated temperatures. *Acta Materialia* 58 (8): 2912–25.
- ZHU, Li hui, Cheng SONG, Wang yang NI, ve Yi xiong LIU. 2016. Effect of 10% Si addition on cathodic arc evaporated TiAlSiN coatings. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)* 26 (6): 1638–46.
- Zukerman, I., A. Raveh, H. Kalman, J. E. Klemberg-Sapieha, ve L. Martinu. 2007. Thermal stability and wear resistance of hard TiN/TiCN coatings on plasma nitrided PH15-5 steel. *Wear* 263 (7–12 SPEC. ISS.): 1249–52.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Yusuf Murat DURMAZ  
Uyruğu : T.C.  
Doğum Tarihi ve Yeri : 15.06.1993 / Erzurum  
Medeni Hali : Bekar  
Telefon : +905396391875  
e-mail : yusufmurat.durmaz@gmail.com

### Eğitim

Derece	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği ABD	2018
Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği	2016
Lise	3 Temmuz Lisesi	2011

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Erzurum Büyükşehir Belediyesi Ejder3200 A.Ş. - 2017