



**TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN İLE KAPLANMIŞ TUNGSTEN  
KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN  
YAPISAL/TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN  
KARAKTERİZASYONU ve PLASTİK ENJEKSİYON  
KALIP ÇELİĞİ FREZELEME  
PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ**

**Ali Sezer ÇAM**

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

**2022  
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TiAIN/TiSiN ve AlCrSiN İLE KAPLANMIŞ TUNGSTEN KARBÜR KESİCİ  
TAKIMLARIN YAPISAL/TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN  
KARAKTERİZASYONU ve PLASTİK ENJEKSİYON KALIP ÇELİĞİ  
FREZELEME PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ**

**Ali Sezer ÇAM**

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

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği**

**Erzurum**

**2022**

**Her hakkı saklıdır**

## **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.

28 / 06 / 2022

Ali Sezer ÇAM

# ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

## **TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN İLE KAPLANMIŞ TUNGSTEN KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN YAPISAL/TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU VE PLASTİK ENJEKSİYON KALIP ÇELİĞİ FREZELEME PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ**

Ali Sezer ÇAM

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih YILDIZ

Bu tez çalışmasında, talaşlı imalatta yaygın olarak kullanılan karbür kesici takım malzemesinin aşınma performansını iyileştirmek amacıyla katodik ark fiziksel buhar kaplama (KAFBK) yöntemi ile çift tabakalı TiAlN/TiSiN ve tek tabakalı AlCrSiN kaplamaları taban malzeme üzerine büyütülmüştür. Kaplamalar, hem karbür silindirik test numuneleri üzerine hem de parmak frezeler üzerine uygulanmıştır. Kaplamaların karakterizasyonu silindirik test numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiş olup kaplamaların yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri X-ışını kırınım ölçer, mikrosertlik cihazı, taramalı elektron mikroskobu (SEM), tribometre test cihazı ve optik profilometre yardımı ile belirlenmiştir. Kaplamaların gerçek çalışma performanslarının saptanması için, işlemsiz ve kaplanmış parmak frezeler ile plastik enjeksiyon kalıp çeliğinden (Impax çeliği) imal edilmiş iş parçası CNC dik işleme merkezinde işlenmiştir. Takım yolları ve G kodları hem klasik kesim hem de yeni nesil kesim stratejisi ile oluşturulmuş olup SolidCAM 2,5 eksen ve iMachining modülleri kullanılmıştır. Frezeleme işlemi sonrası, kesici takımların aşınma performansı kütle kaybı yöntemiyle ve SEM analizleri yapılarak incelenmiştir. Ayrıca talaşlı imalat işlemleri sonrası çelik iş parçasının yüzey kalitesi tespit edilmiştir. Çift tabakalı TiAlN/TiSiN ince film kaplanmış numunenin sertlik ve adezyon sonuçları, tek tabakalı AlCrSiN kaplanmış numuneden daha yüksek olup, bunun bir sonucu olarak çift tabakalı TiAlN/TiSiN ince film kaplanmış numunenin aşınma oranı değeri daha düşük olarak elde edilmiştir. 2,5 eksen modülü kullanılarak gerçekleştirilen frezeleme işlemlerinde, iMachining modülüne göre daha iyi yüzey kalitesi ve daha az kütle kaybı gözlenmesine karşın, iMachining modülü işleme süresini önemli ölçüde azaltmıştır.

**2022, 76 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** TiAlN/TiSiN, AlCrSiN, Frezeleme, Kesici Takım, Aşınma, Çift Tabakalı Kaplama, iMachining

## ABSTRACT

MS. Thesis

### CHARACTERIZATION OF STRUCTURAL/TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF TUNGSTEN CARBIDE CUTTING TOOLS COATED WITH TiAlN/TiSiN AND AlCrSiN AND THEIR MILLING PERFORMANCES ON PLASTIC INJECTION DIE STEEL

Ali Sezer ÇAM

Erzurum Technical University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof Dr. Fatih YILDIZ

In this thesis, double-layer TiAlN/TiSiN and single-layer AlCrSiN coatings were grown on the base material by cathodic arc physical vapor deposition (CAPVD) technic to enhance the wear performance of carbide cutting tool material produced for machining plastic injection die steel in machining. Coating processes were applied both on carbide end mills and on cylindrical test specimens. Characterization of coatings was applied on cylindrical test specimens. The tribological, mechanical and structural characteristics of the produced coatings were determined via X-ray diffraction meter, microhardness device, tribometer, scanning electron microscope (SEM) and optical profilometer. So as to specify the real working effect of the coatings, the workpiece made of plastic injection die steel (Impax steel) with untreated and coated end mills was machined with CNC vertical machining center. G codes and toolpaths were created with both classical cutting and modern cutting strategies. After the machining, the wear performance of the cutting tools was investigated by SEM and mass loss method. Also, the surface grade of the steel work piece was determined after the machining processes. The adhesion and hardness results of the double-layered TiAlN/TiSiN thin film coated specimen were higher than the single-layer AlCrSiN coated specimen. Consequently, the value of wear rate of the double-layered TiAlN/TiSiN thin film coated specimen was less than AlCrSiN coated and uncoated samples. Although better surface quality and less mass loss are observed in milling operations performed using the 2,5-axis module, the iMachining module was more advantageous as regards machining time.

**2022, 76 pages**

**Keywords:** TiAlN/TiSiN, AlCrSiN, Milling, Cutting Tool, Wear, Double Layer Coating, iMachining

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca ilgisini, bilgisini ve tecrübesini esirgemeyen, karşılaştığım her türlü sorunda bana yol gösterip yardımcı olan ve bu çalışmamın tamamlanmasında beni sürekli motive ederek desteğini her an hissettiğim saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Fatih YILDIZ' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında bana zaman ayırıp bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Dr. Öğr. Üyesi İlyas HACISALİHOĞLU'na, Arş. Gör. Gürkan KAYA'ya, Mak. Yük. Müh. Tevfik Oğuzhan ERGÜDER'e ve Öğr. Gör. Mustafa YAZICI'ya içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde büyük emekleri olan ve hayatım boyunca desteklerini her zaman hissettiğim annem Fatma ÇAM'a, babam Hikmet ÇAM'a ve ablalarım Gülnaz GÜNDÜZ ile Sezin GÜNDÜZ'e teşekkürlerimi sunarım.

**Ali Sezer ÇAM**

**Haziran 2022**

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	iv
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	vi
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	vii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	ix
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. İmalat Teknolojisi .....	1
1.1.1. Talaşlı imalat.....	3
1.1.1.1. Kesici takım tasarımı, takım ömrü ve kesici takım malzemeleri.....	5
1.2. Aşınma .....	8
1.3. Yüzey İşlemleri .....	10
1.3.1. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) .....	12
1.3.1.1. Katodik ark fiziksel buhar kaplama (KAFBK) tekniği.....	12
1.3.2. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) .....	14
1.3.3. Farklı türdeki kaplama yapıları .....	14
1.3.4. Kesici takımların kaplanması.....	16
1.4. Bilgisayar Destekli Üretim.....	18
1.4.1. SolidCAM 2,5 eksen modülü.....	18
1.4.2. SolidCAM iMachining modülü.....	19
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....	21
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	27
3.1. Materyal .....	27
3.2. X Işını Kırınımı (XRD) Analizi .....	29
3.3. Aşınma Deneyleleri .....	29
3.4. Çizik Testi ve Kritik Yük Analizi .....	31
3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri .....	32
3.6. 3D Yüzey Profilometre Analizleri .....	33
3.7. Mikrosertlik Ölçümleri .....	33

3.8. Kütle Kaybı Analizi .....	34
3.9. Dağlama İşlemi ve Kaplama Kalınlığı Analizi .....	35
3.10. Klasik Kesim ve Yeni Nesil Kesim Stratejisi .....	35
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....</b>	<b>40</b>
4.1. XRD Bulguları .....	40
4.2. Kaplama Yüzey Morfolojisi, Pürüzlülük ve Kalınlık Bulguları .....	41
4.3. Mikro Sertlik Bulguları .....	43
4.4. Çizik (Scratch) Testi Analizleri .....	44
4.5. Aşınma Testi Bulguları .....	46
4.5.1. İşlemsiz ve kaplanmış numunelerin sürtünme katsayıları .....	46
4.5.2. İşlemsiz ve kaplanmış numunelerin aşınma oranları ile aşınma izi SEM görüntüleri .....	48
4.6. İşlemsiz ve Kaplanmış Kesici Takımların Talaşlı İmalat Performansları .....	50
4.6.1. İşlemsiz ve kaplanmış kesici takımlardaki aşınma bulguları.....	50
4.6.2. Talaşlı imalat sonrası iş parçalarının yüzey pürüzlülükleri.....	54
<b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>57</b>
5.1. Sonuçlar .....	57
5.2. Öneriler .....	59
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>60</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
A°	Angstrom
$\lambda$	Dalga boyu
°	Derece
S	Devir sayısı
GPa	Gigapaskal
F	İlerleme hızı
L <sub>c</sub>	Kritik yük
m	Metre
$\mu$ m	Mikronmetre
ml	Mililitre
mm	Milimetre
N	Newton
R <sub>a</sub>	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
s	Saniye
°C	Santigrat derece
HV	Vickers sertlik birimi

### **Kısaltmalar**

CAM	Bilgisayar Destekli İmalat
CNC	Bilgisayar Destekli Sayısal Kontrol
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
KAFBK	Katodik Ark Fiziksel Buhar Kaplama
PLC	Programlanabilir Mantık Denetleyicisi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X ışını kırınım ölçer
HSS	Yüksek Hız Çeliği

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Frezeleme işleminde kullanılan ince film kaplanmış kesici takımlar.....	1
Şekil 1.2. Ortogonal (a) ve eğik (b) kesme modeli .....	4
Şekil 1.3. Bazı önemli takım tezgahlarının çalışma hareketleri.....	4
Şekil 1.4. Kesici takım malzemelerinin sıcaklık-sertlik ilişkisi.....	6
Şekil 1.5. Yaygın olan aşınma türleri (a) Adezif aşınma, (b) Abrazif aşınma, (c) Yorulma aşınması, (d) Tribokimyasal aşınma.....	9
Şekil 1.6. Katodik ark fiziksel buhar kaplama tekniğinin şematik görüntüsü .....	13
Şekil 1.7. Farklı türlerdeki kaplama konfigürasyonları .....	14
Şekil 3.1. Silindirik test numuneleri .....	27
Şekil 3.2. İşlemsiz ve kaplanmış karbür parmak frezeler .....	28
Şekil 3.3. X ışını kırınımı (XRD) cihazı.....	29
Şekil 3.4. Tribometre test cihazı. ....	30
Şekil 3.5. Kesici takımdaki yan kenar aşınma bölgesi.....	31
Şekil 3.6. Optik mikroskop cihazı .....	32
Şekil 3.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	32
Şekil 3.8. 3D Profilometre cihazı.....	33
Şekil 3.9. Mikrosertlik ölçüm cihazı.....	34
Şekil 3.10. Elektronik hassas laboratuvar terazisi.. ....	34
Şekil 3.11. Dağlama işlemi görüntüsü .....	35
Şekil 3.12. Üç eksenli CNC dik işleme merkezi.....	36
Şekil 3.13. CAM yazılımında tanımlanan stok ve hedef model .....	36
Şekil 3.14. Talaşlı imalatta kullanılan iş parçası.....	37
Şekil 3.15. SolidCAM simülasyon aşamaları .....	37
Şekil 3.16. 2,5 eksen modülünde kullanılan kesme parametreleri.....	38
Şekil 3.17. iMachining modülünde kullanılan kesme parametreleri .....	39
Şekil 4.1. İşlemsiz ve kaplanmış numunelerin XRD grafikleri .....	40
Şekil 4.2. TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN ince filmlerinin yüzey morfolojisi SEM görüntüleri .....	41
Şekil 4.3. İşlemsiz ve kaplanmış numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri. ....	42
Şekil 4.4. TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN kaplamalarına ait kesit SEM görüntüleri.....	42
Şekil 4.5. Mikrosertlik değerleri .....	43

<b>Şekil 4.6.</b> TiAlN/TiSiN kaplanmış numuneye ait çizik testi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı-sürtünme kuvveti diyagramı ile uygulanan yük ilişkisi ve oluşturulan izlere ait birleştirilmiş optik mikroskop görüntüleri. ....	44
<b>Şekil 4.7.</b> AlCrSiN kaplanmış numuneye ait çizik testi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı-sürtünme kuvveti diyagramı ile uygulanan yük ilişkisi ve oluşturulan izlere ait birleştirilmiş optik mikroskop görüntüleri. ....	45
<b>Şekil 4.8.</b> Çizik testi sonrası izlerde oluşan hasarların optik mikroskop görüntüleri ....	46
<b>Şekil 4.9.</b> İşlemsiz tungsten karbür, TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN ile kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları grafiği .....	47
<b>Şekil 4.10.</b> Aşınma izi optik profilometre görüntüleri (a) TiAlN/TiSiN, (b) AlCrSiN. .	48
<b>Şekil 4.11.</b> İşlemsiz WC, TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN filmleri ile kaplanmış numunelere ait aşınma oranları grafiği .....	49
<b>Şekil 4.12.</b> İşlemsiz WC, TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN filmleri ile kaplanmış numunelere ait aşınma izi SEM görüntüleri .....	50
<b>Şekil 4.13.</b> Klasik kesim stratejisi ile test edilen kesici takımların yan kenar aşınma genişlikleri.....	52
<b>Şekil 4.14.</b> Yeni nesil kesim stratejisi ile test edilen kesici takımların yan kenar aşınma genişlikleri.....	53
<b>Şekil 4.15.</b> Klasik ve yeni nesil kesim stratejisi ile test edilen kesici takımların kütle kayıpları grafiği.....	54
<b>Şekil 4.16.</b> Klasik kesim stratejisi ile frezeleme işlemi sonrası iş parçası yüzey pürüzlülük görüntüleri.....	55
<b>Şekil 4.17.</b> Yeni nesil kesim stratejisi ile frezeleme işlemi sonrası iş parçası yüzey pürüzlülük görüntüleri.....	55
<b>Şekil 4.18.</b> İş parçası yüzey pürüzlülüğü değerleri .....	56

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. İmalat işlemlerinin sınıflandırılması.....	2
Çizelge 1.2. İmalat teknolojisinin sınıflandırılması.....	3
Çizelge 1.3. Yüzey mühendisliğinde uygulanan yöntemler .....	11
Çizelge 3.1. Kaplama parametreleri.....	27
Çizelge 3.2. Plastik enjeksiyon kalıp çeliği (impax çeliği) kimyasal bileşimi .....	28
Çizelge 3.3. Aşınma deneyi parametreleri.....	30



### 1. GİRİŞ

Sürekli büyüyen ve gelişen teknoloji ağında, üretim yöntemlerinin çok önemli bir halkası olan talaşlı imalat sektöründe de malzemelerin performans iyileştirmelerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu performans iyileştirmelerinde yüzey işlemlerinden büyük ölçüde faydalanılmaktadır. Yüzey kaplamaları da bu işlemlerden biridir. Uygulanan bu kaplamaların amacı, kaplama yapılan taban malzemenin yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmeye yöneliktir. Özellikle sanayi sektöründe kesici takımlara uygulanan farklı yöntem ve yapılarıdaki ince film kaplamalar, yüzey kaplamalarına örnek olarak verilebilir. Şekil 1.1’de frezeleme işleminde kullanılan bazı kesici takımların ince film kaplanmış haldeki görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 1.1.** Frezeleme işleminde kullanılan ince film kaplanmış kesici takımlar (Anonymous, 2017).

#### 1.1. İmalat Teknolojisi

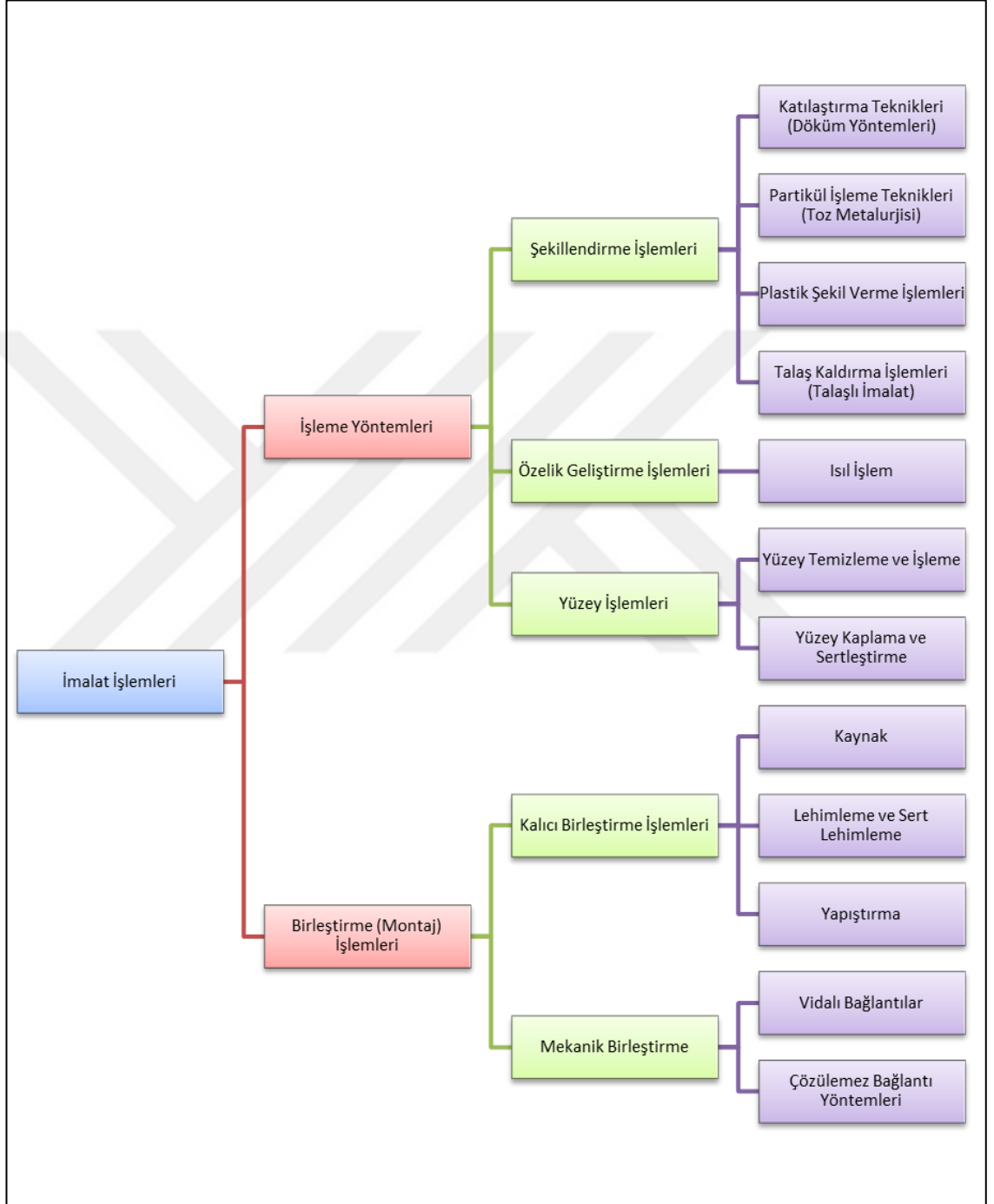
Bir ülkenin gelişmişlik düzeyini önemli ölçüde arttıran etkenlerden biri olan ve aynı zamanda dışa bağımlılığın önüne geçerek ülkenin ekonomik olarak kalkınmasında da büyük bir rol oynayan imalat, ham maddelerin çeşitli işlemlere tabi tutulması sonucu ortaya koyduğu ürün sürecinin bütününe verilen isimdir.

İmalat işlemleri, malzemelere değer katmak amacıyla kimyasal ya da fiziksel olarak değiştirilmesini sağlayan işlemlerdir. Bu işlemler temel olarak iki sınıfta incelenir. Birincisi, iş parçasının istenen nihai ürüne dönüştürülmesi işlemleri yani işleme yöntemleridir. Diğeri ise iki ya da daha fazla parçanın bir araya getirilerek birleştirilmesi

## 1. GİRİŞ

işlemleri yani montaj işlemleridir. İmalat işlemlerinin sınıflandırılması Çizelge 1.1’de verilmiştir.

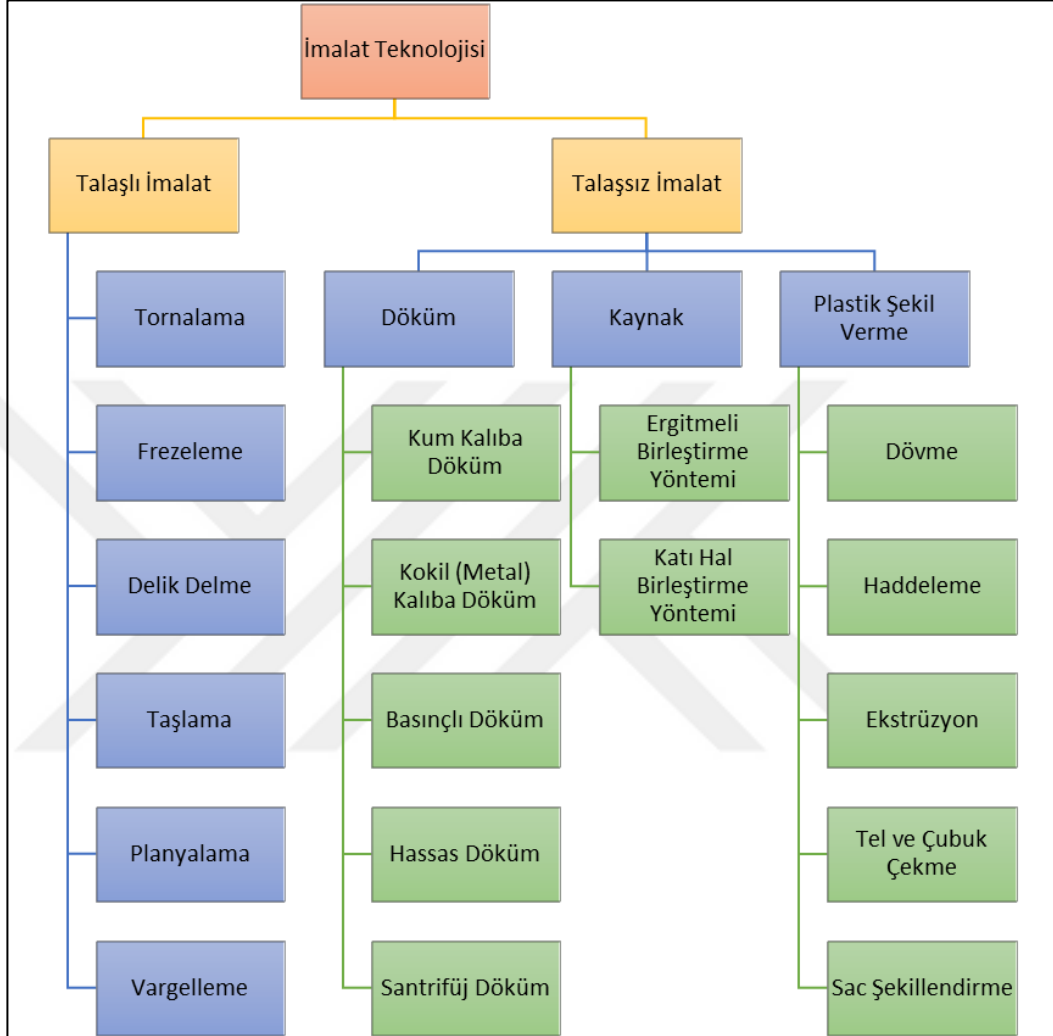
**Çizelge 1.1.** İmalat işlemlerinin sınıflandırılması (Groover et al., 2016)



## 1. GİRİŞ

İmalat teknolojisi genel anlamda talaşlı ve talaşsız imalat olmak üzere ikiye ayrılır. İmalat teknolojisinin sınıflandırılması Çizelge 1.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.2.** İmalat teknolojisinin sınıflandırılması

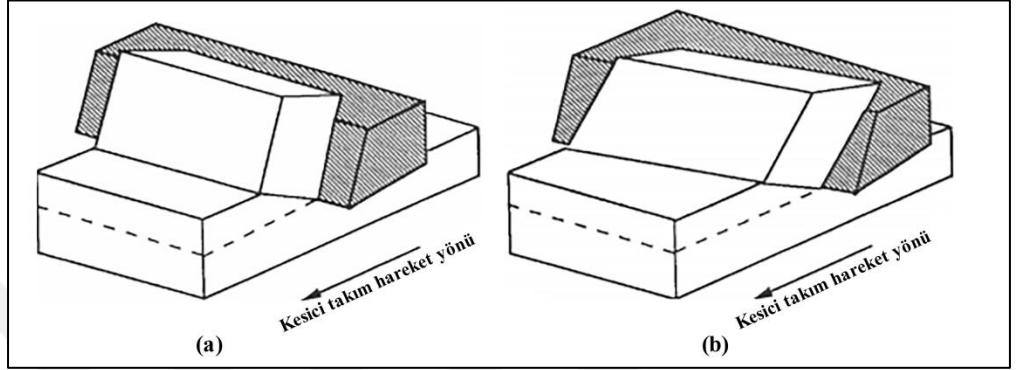


### 1.1.1. Talaşlı imalat

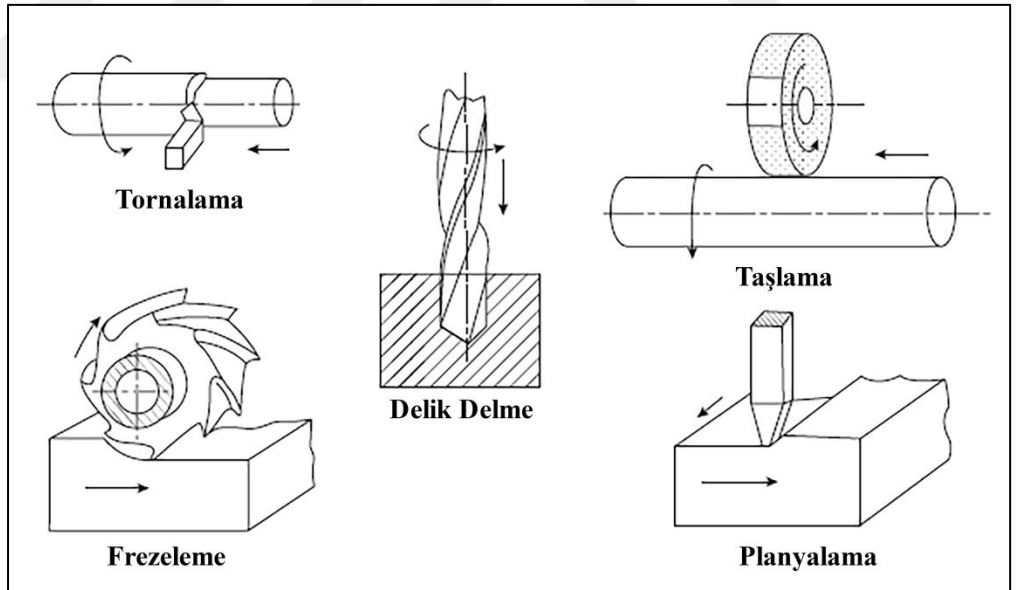
Talaşlı imalat, bir iş parçasından kesici takım yardımıyla mekanik olarak talaş adı verilen malzeme fazlalığının çıkarılarak istenilen özelliklerdeki geometriye dönüştürüldüğü bir işlemdir. İş parçası üzerinde istenilen şeklin elde edilebilmesi için kesici takımın kesici kenarının iş parçasına göre belirli bir şekilde hareket etmesi gerekmektedir. İş parçası ve kesici kenar arasındaki göreceli hareket, iş parçasının, kesici takımın hareketiyle veya hem iş parçasının hem de kesici takımın hareketlerinin bir kombinasyonu ile elde edilebilir (Mehta, 2015). İş parçasına istenen şekli vermek için

## 1. GİRİŞ

gerekli olan bu bağıl hareketler, çoğu işleme operasyonunda kesme hızı adı verilen bir birincil hareket ve ilerleme adı verilen ikincil bir hareket aracılığıyla elde edilir. Takımın şekli ve çalışma yüzeyine nüfuzu bu hareketlerle birlikte ortaya çıkan çalışma yüzeyinin istenen geometrisini üretir. Şekil 1.2’de ortogonal kesme modeli adı verilen basitleştirilmiş bir işleme modeli ve buna ilave olarak eğik kesme modeli, Şekil 1.3’te ise bazı önemli takım tezgahlarının çalışma hareketleri gösterilmiştir (Groover, 2019).



Şekil 1.2. Ortogonal (a) Ve eğik (b) Kesme modeli (Stephenson & Agapiou, 2016)



Şekil 1.3. Bazı önemli takım tezgahlarının çalışma hareketleri (Mehta, 2015)

### 1.1.1.1. Kesici takım tasarımı, takım ömrü ve kesici takım malzemeleri

Kesici takım tasarımı, talaşlı imalatta işleme performansı açısından önemli bir konuma sahiptir. Takım tasarımının hatalı olması kalitesiz iş parçaları üretmeye, takım aşınmasına sebebiyet verir. Böyle bir durumda üretkenlik azalarak maliyet artışı meydana gelir. Takımlar düzgün tasarlandığı zaman ise daha kaliteli parçalar üretilir ve takım ömrü daha uzun olur.

Kesici takımların işleme fonksiyonunu yerine getirememelerinin temel sebepleri; kırılma (çatlama) bozulması, sıcaklık bozulması ve sürekli aşınmadır. Bunlar aynı zamanda kesici takım malzemesinde olması gereken üç temel özelliğin tanımlanmasını sağlar. Bu özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- Tokluk
- Sıcak (Kızıl) Sertlik
- Aşınma Direnci (Groover, 2019)

Takım ömrü, önceden belirlenen bir kritere göre takımın kesme işleminde kullanılabileceği etkin süre olarak tanımlanabilir. Bir takımın belirlenen işlevleri başarılı bir şekilde yerine getirememesi de takım ömrünü belirlemenin bir yoludur (Mehta, 2015). İşlenen parçaların kalitesini önemli derecede etkileyen ve kesici takım ömrünün azalmasına neden olabilecek ve birbirini etkileyen kriterler şunlardır:

- İş parçası toleranslarını sürdürme yeteneği
- İşlenmiş yüzey dokusu kalitesinin korunması
- Talaş kırma yeteneğinde verimlilik (Smith, 2008)

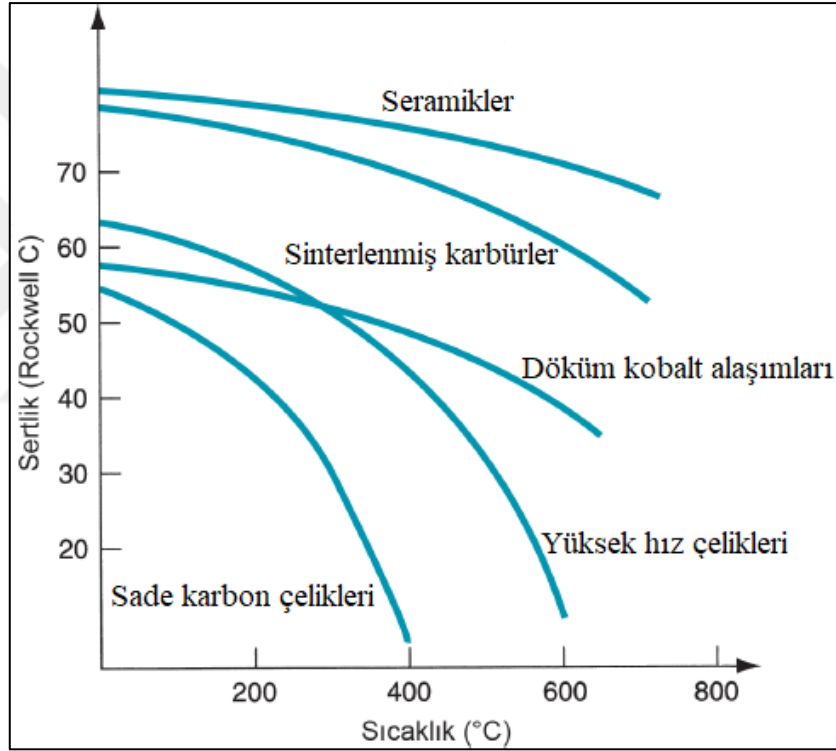
Talaşlı imalatta kullanılan kesici takımlar, belirtilen bu özelliklerin tamamına aynı anda sahip olamayabilirler. Buna bağlı olarak talaşlı imalatta kullanılan kesici takım malzemeleri şu şekildedir:

- Sade Karbon, Düşük Alaşım ve Yüksek Hız Çelikleri (HSS)

## 1. GİRİŞ

- Döküm Kobalt Alaşımları
- Sinterlenmiş Karbürler, Sermetler ve Kaplanmış Karbürler
- Seramikler
- Sentetik Elmas ve Kübik Bor Nitrür Takımlar

Sade karbonlu çelikler günümüzde talaşlı imalat alanında nadiren kullanılmaktadırlar. Düşük alaşımları sebebiyle düşük sıcak (kıızıl) sertliğe (Şekil 1.4) sahiptirler. Bu durum sade karbonlu çelikleri modern standartlara göre pratik olamayacak kadar yavaş kesme hızları dışında kullanılamaz bir hale getirmiştir.



Şekil 1.4. Kesici takım malzemelerinin sıcaklık-sertlik ilişkisi (Groover, 2019)

Yüksek hız çelikleri (HSS), sertliklerini yüksek sıcaklıklarda sade karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerden daha iyi koruyabilen yüksek alaşımlı takım çelikleridir. Kıızıl sertliklerinin iyi olması, HSS'den yapılmış takımların daha yüksek kesme hızlarında kullanılmasına izin verir. Günümüzde kullanılan en önemli kesici takım malzemelerinden olan yüksek hız çeliklerinin aynı zamanda toklukları da yüksektir. Ayrıca kesme performanslarının artırılması amacıyla çeşitli ince film kaplama yöntemleri de uygulanabilir.

## 1. GİRİŞ

---

Döküm kobalt alaşımlı kesici takımlar, yaklaşık %40-50 oranında kobalt, %25-35 oranında krom, %15-20 oranında tungsten ve eser miktarlarda diğer elementlerden oluşurlar. Bu takımlar, grafit kalıplara dökülerek nihai boyutlarına getirilir ve daha sonra taşlanarak son şekillerini alırlar. Döküm kobalt alaşımlarının aşınma direnci ve kızıl sertlikleri yüksek hız çeliklerinden daha iyi fakat sinterlenmiş karbürlerden daha düşüktür.

Sinterlenmiş karbürler, bağlayıcı olarak kobalt (Co) ile toz metalurjisi teknikleri kullanılarak tungsten karbürden (WC) elde edilmiş sert takım malzemeleridir. WC dışında titanyum karbür (TiC) ve tantalum karbür (TaC) gibi farklı karbür türleri içeren sinterlenmiş karbür takımlar da vardır. Bu takımların genel özellikleri şu şekildedir:

- Yüksek bası mukavemeti
- Yüksek sertlik
- İyi kızıl sertlik
- İyi aşınma direnci
- Yüksek ısı iletkenlik
- Yüksek elastisite modülü
- HSS'ten düşük tokluk

Sermetler, seramik ve metalik malzemelerin bir bileşimidir. Sinterlenmiş karbürler bu tanıma uymakla birlikte, WC-TiC-TaC-Co dahil WC-Co bazlı sermetler, yaygın kullanımda sinterlenmiş karbürler olarak bilinir. Çeliklerin, paslanmaz çeliklerin ve dökme demirlerin yüksek hızlarda işlenmesinde kullanılan takımlardır.

Kaplanmış karbürler, sinterlenmiş karbür takımların TiC, TiN ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi seramikleri içeren seramik-metal kompozitlere tek veya çok tabakalı şekilde kaplanması ile elde edilirler. En uygun kaplama kalınlığı aralığının alt ucunda PVD ve üst ucunda CVD kaplamalar olmak üzere 2,5-20 µm aralığında değişir. Kaplanmış karbürler, tornalama ve frezeleme işlemlerinde dökme demirleri ve çelikleri işlemek için kullanılırlar.

Seramik kesici takımlar, ince taneli alüminyum oksitten (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) oluşarak yüksek basınç ve sıcaklıklarda bağlayıcı kullanmadan sinterlenerek üretilirler. Seramik takımlar

## 1. GİRİŞ

---

üretirken,  $Al_2O_3$  tozunda çok ince tanecik boyutu kullanmak ve yüksek basınçlı sıkıştırma yoluyla karışımın yoğunluğunu en üst düzeye çıkarmak kesici takımın tokluğunu iyileştirmek için önemlidir.  $Al_2O_3$  seramik kesici takımlar, dökme demir ve çeliğin yüksek hızda tornalanmasında oldukça başarılıdır.

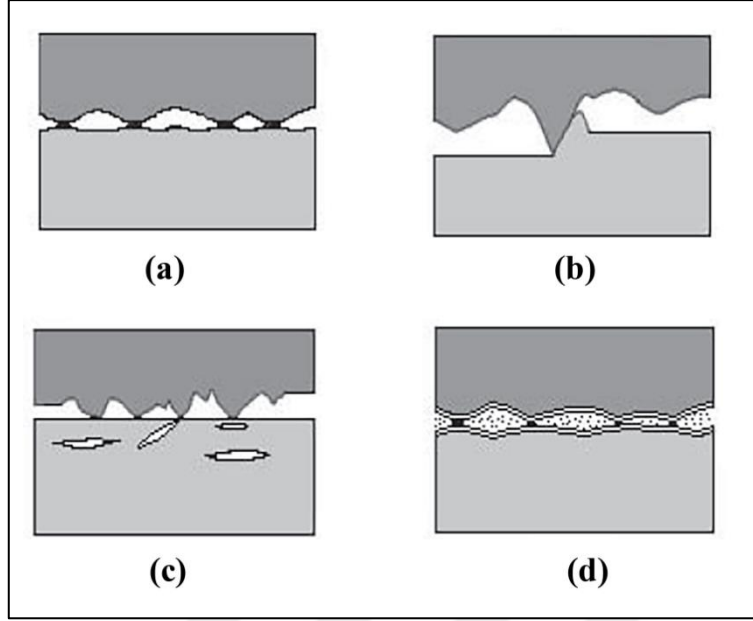
Kesici takımların istenen özelliklerinden biri yüksek sertlik olduğundan işleme ve taşlama işlemlerinde elmaslar da kullanılabilir. Bilinen en sert malzeme olan elmaslar, bazı sertlik ölçülerine göre WC veya  $Al_2O_3$ 'ten üç ila dört kat daha serttir. Sentetik elmas kesici takımlar, ince taneli elmas kristallerinin yüksek sıcaklık ve basınç altında istenilen şekle sinterlenmesiyle elde edilirler. Demir dışı metaller elmas kesici takımların uygulama alanları arasında yaygın bir şekilde yer alır. Elmastan sonra kübik bor nitrürler (cBN) bilinen en sert malzemelerdir ve üretimleri sentetik elmaslarla aynı şekilde gerçekleştirilir. Hem sentetik elmas hem cBN kesici takımların maliyeti diğer kesici takımlara göre daha fazladır (Groover, 2019).

### 1.2. Aşınma

Aşınma, bir malzeme yüzeyinin diğerinin üzerinde hareket etmesi sonucunda zamanla oluşan kütle kaybı olarak tanımlanabilir. Oluşan bu kütle kaybı malzemenin pürüzlülüğünün artmasına sebep olur. Bu da farklı hasar mekanizmalarının oluşumunu tetikleyerek malzemenin statik ve dinamik yükler altındaki dayanımını olumsuz yönde etkiler.

Aşınma türleri yaygın olarak 4 farklı mekanizmada sınıflandırılabilir:

1. Adezif (Yapışma) Aşınma
2. Abrazif (Kazıma) Aşınma
3. Yorulma Aşınması
4. Tribokimyasal Aşınma



**Şekil 1.5.** Yaygın olan aşınma türleri (a) Adezif aşınma, (b) Abrasif aşınma, (c) Yorulma aşınması, (d) Tribokimyasal aşınma (Takadoum, 2008).

**Adezif (yapışma) aşınma:** İki katı yüzeyin birbirine teması sonucundaki malzeme etkileşimidir. Gereken enerji, yüksek basınç ve sürtünme ısısı ile sağlanır. Sürtünmeye maruz kalan yüzeyler arasındaki bağlantı yerleri güçlü olduğunda, sertliği az olan malzeme daha sert olan malzemeye geçiş yaparak burada yapışık kalır. Bu olaya adezif (yapışma) aşınma adı verilir (Şekil 1.5a). Malzemeler arasındaki yağlama işleminin çok iyi yapılması adezif aşınmayı azaltır.

**Abrasif (kazıma) aşınma:** Katı bir yüzey boyunca hareket eden sert parçacıkların hareket ettiği yüzeyi oyarak veya çizikler meydana getirerek malzemenin yüzeyden kopmasıyla aşınma meydana gelir (Şekil 1.5b). Kazıma aşınması olarak da bilinir. Bunu engellemek için daha sert malzemeler kullanılabilir. Ancak sert malzemelerin de kırılgan bir yapıya sahip olduğu unutulmamalıdır.

**Yorulma aşınması:** İki yüzey arasında tekrarlı yükler sonucunda oluşan gerilmeler sebebiyle malzeme yorulması meydana gelir. Bu durum malzeme içinde yüzeye yakın bölgede çatlakların oluşması ve bunların yayılmasına neden olur. Kritik bir boyuta geldiğinde yüzeyden küçük parçalar halinde döküntüler meydana gelerek yorulma aşınması oluşur (Şekil 1.5c).

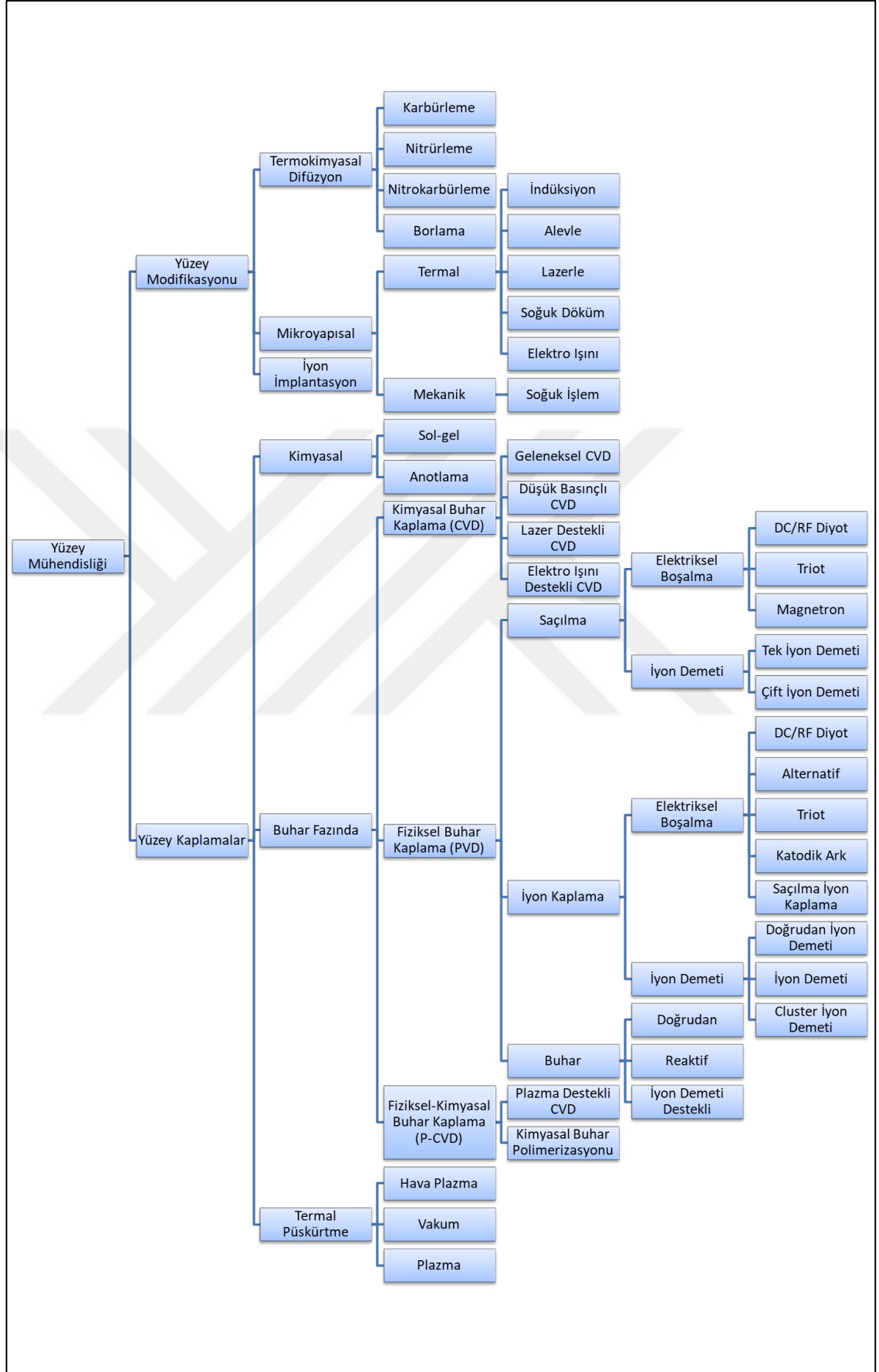
Yorulma aşınması genellikle makine elemanlarında görülen bir aşınma türüdür. Dişli çark, bilyalı ve makaralı rulmanlar, pres bağlantıları, aks ve şaftlar vb. elemanlarda çok önemli aşınmalara sebebiyet verebilir. Bunun önüne geçebilmek için malzeme yüzeyine film kaplaması uygulanabilir.

**Tribokimyasal aşınma:** Birbiriyle temas halindeki iki yüzey ve çevredeki ortam arasında kimyasal etkileşimler meydana gelebilir. Meydana gelen etkileşimler nedeniyle reaksiyon ürünü oluşarak döküntüler meydana gelir (Şekil 1.5d). Bu duruma tribokimyasal aşınma denir. Burada oluşan reaksiyon diğer aşınma türlerinden farklı olarak ara malzeme ile ortam arasında gerçekleşir. Yalnızca temas yüzeyinde gerçekleşmesi korozyondan farklı bir tür olduğunun göstergesidir.

### 1.3. Yüzey İşlemleri

Bir malzemenin mevcut olan yüzey özelliklerinin iyileştirilmesine dayanan işlemlere yüzey işlemleri adı verilir. Yüzey işlemlerinin amacı malzemenin mekanik ve tribolojik özelliklerini olumlu yönde arttırmaya yöneliktir. Otomotiv, inşaat, havacılık, makine elemanları, elektrik sanayi gibi alanlarda önemli rol oynar. Yüzey işlemlerinin sınıflandırılması Çizelge 1.3'te verilmiştir.

Çizelge 1.3. Yüzey mühendisliğinde uygulanan yöntemler (Yıldız, 2005)



### 1.3.1. Fiziksel buhar biriktirme (PVD)

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD), bir malzemenin vakum odasında buhar fazına dönüştürüldüğü ve çok ince bir tabaka halinde bir alt tabaka yüzeyi üzerinde yoğunlaştığı bir grup ince film prosesidir. PVD yöntemi, metallere, alaşımlar, seramikler ve diğer inorganik bileşikler ve hatta bazı polimerler gibi çok çeşitli kaplama malzemelerinin uygulanması için kullanılabilir. Olası taban malzemeler arasında metallere, cam ve plastikler bulunur. Bundan dolayı PVD, neredeyse sınırsız bir kaplama maddesi ve taban malzemesi kombinasyonuna uygulanabilen çok yönlü bir kaplama teknolojisini temsil eder.

Tüm fiziksel buhar biriktirme işlemleri şu adımlardan oluşur:

1. Kaplama buharının sentezlenmesi
2. Buharın alt tabakaya taşınması
3. Buharın alt tabaka yüzeyi üzerinde yoğunlaştırılması

Bu adımlar genellikle bir vakum odası içerisinde gerçekleştirilir. Kaplama buharının sentezi, mevcut bir katıyı (veya sıvıyı) buharlaştırmak için elektrik dirençli ısıtma veya iyon bombardımanı gibi çeşitli yöntemlerden herhangi biri ile gerçekleştirilebilir. Bu ve diğer varyasyonlar, birkaç PVD işlemiyle sonuçlanarak üç farklı türe ayrılırlar:

1. Vakumlu buharlaştırma
2. Saçılma
3. İyon kaplama (Groover, 2019)

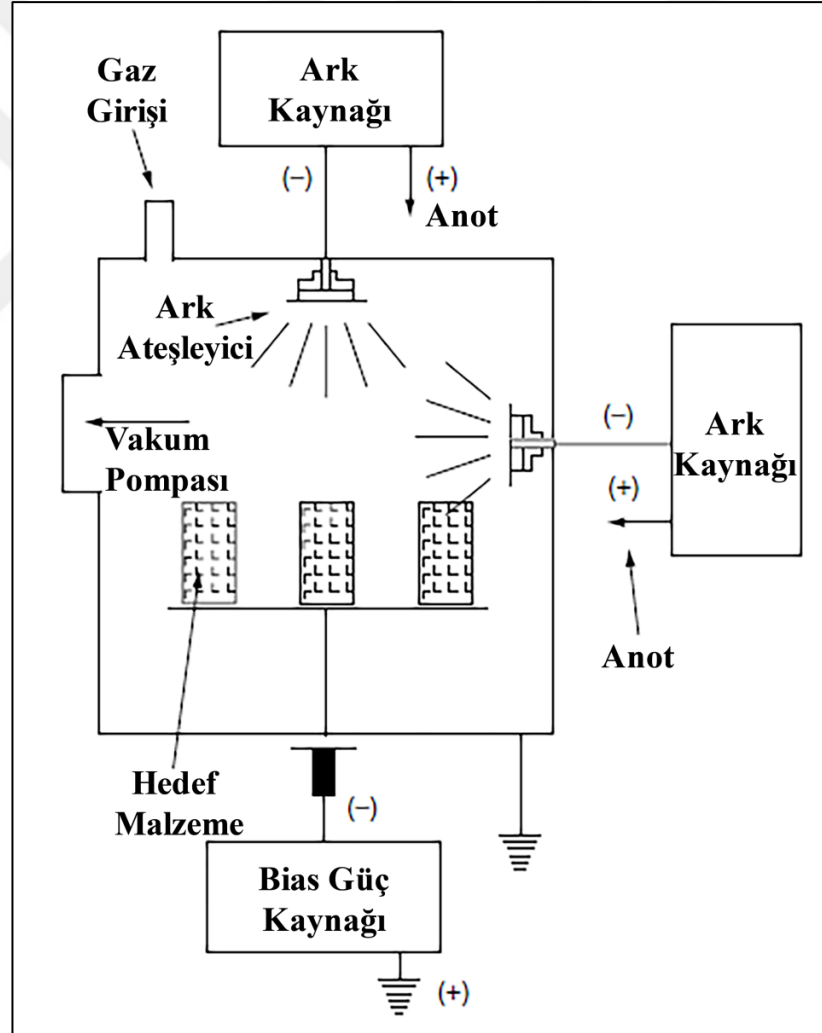
#### 1.3.1.1. Katodik ark fiziksel buhar kaplama (KAFBK) tekniği

Kesici takım uygulamalarında oldukça başarılı bir konuma sahip olan bu teknik kaynak malzemenin buharlaştırılarak iyonize olması esasına dayanır. Yüksek iyon enerjisine sahip olan bu kaplama tekniğinde elektrik arkı kullanılır. Bu yöntemde, kaplamanın taban malzeme yüzeyine adezyonu oldukça yüksektir. Bunun yanı sıra

## 1. GİRİŞ

malzemenin aşınma ve korozyon direnci gereksinimlerini karşılayacak kaplamaların elde edilmesi mümkündür.

Katodik ark işleminde, kaynak malzeme ark devresindeki katot olan bir veya daha fazla vakum arkının hareketiyle buharlaştırılır. Temel kaplama sistemi, bir vakum odası, bir katot, bir anot, bir ark güç kaynağı, bir ark ateşleyici ve bias güç kaynağından oluşur. Arklar, kaynak malzemeye bağlı olarak 15-50 V aralığındaki voltajlarla sürdürülür ve 30-400 A aralığındaki tipik ark akımları kullanılır. Yüksek akımlar kullanıldığında, bir ark noktası katot yüzeyinde çok sayıda noktaya ayrılır. Bu noktaların sayısı katot malzemesine bağlıdır (Tracton, 2006).



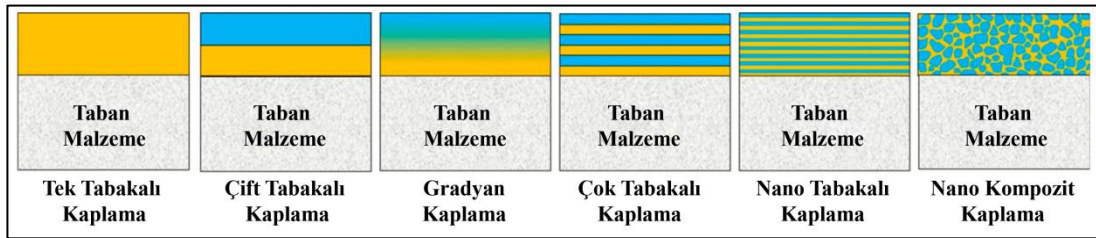
Şekil 1.6 Katodik ark fiziksel buhar kaplama tekniğinin şematik görüntüsü (Tracton, 2006).

### 1.3.2. Kimyasal buhar biriktirme (CVD)

Fiziksel buhar biriktirme, bir kaplamanın buhar fazından bir alt tabaka üzerine yoğunlaşma yoluyla biriktirilmesini içerir. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) ile karşılaştırıldığında, bir gaz karışımı ile ısıtılmış bir alt tabaka yüzeyi arasındaki etkileşimi içerir. Bu da bazı gaz bileşenlerinin kimyasal olarak ayrışmasına ve alt tabaka üzerinde katı bir film oluşmasına neden olur. Reaksiyonlar, kapalı bir tepkime odasında gerçekleşir. Reaksiyon ürünü (bir metal veya bir bileşik), kaplamayı oluşturmak için alt tabaka yüzeyinde çekirdeklenir ve büyür. Çoğu CVD reaksiyonu ısı gerektirir. Bununla birlikte ilgili kimyasallara bağlı olarak, reaksiyonlar ultraviyole ışık veya plazma gibi diğer olası enerji kaynakları tarafından yürütülebilir. CVD geniş bir basınç ile sıcaklık aralığı ve çok çeşitli kaplama ile alt tabaka malzemelerine uygulanabilir (Groover, 2019).

### 1.3.3. Farklı türdeki kaplama yapıları

Kaplama yapıları, tek katmanlı kaplamadan çok katmanlı kaplamaya kadar çeşitli tasarımlara sahip olabilir. Farklı tasarımlara sahip kaplamalar farklı mimari tiplere sahiptir. Yani farklı problemlerle başa çıkmak için farklı mimariler seçilir. Özellikle günümüzde daha fazla kullanılan çok katmanlı kaplamalar, farklı özelliklerdeki kaplama katmanlarının üstünlükleri bir araya getirilerek oluşturulmaktadır. Daha yüksek katman sayısına sahip kaplamaların, daha yüksek sertliğe ve çatlak yayılmasına karşı daha yüksek dirençte sahip olduğu görülmüştür. Farklı kaplama konfigürasyonlarına ait bir gösterim Şekil 1.7’de verilmiştir.



Şekil 1.7. Farklı türlerdeki kaplama konfigürasyonu (Sousa & Silva, 2020)

**Tek tabakalı kaplama:** İlk kaplama, 10-12 µm kalınlığında tek tabakalı TiC tabakasıydı ve Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) işlemiyle sert bir metal taban malzeme üzerine biriktirilmiştir. Bir sonraki gelişme, sert metal taban malzemenin herhangi bir

## 1. GİRİŞ

---

karbonsuzlaşmasını önleyen tek tabakalı TiN kaplamadır. TiN, TiC'den daha iyi bir difüzyon bariyeridir fakat TiC daha iyi aşınma direncine sahiptir. Sert metalin aksine TiN, yüksek hız çeliği için mükemmel bir tek katmanlı kaplamadır (Edwards, 1993).

**Çift tabakalı kaplama:** Taban malzeme üzerine uygulanan, bir bağlayıcı tabaka ve bir üst tabakadan oluşan çift tabakalı kaplama gelişmiş teknolojik avantajlara sahiptir. Laboratuvar korozyon testleri, iki katmanlı titanyum nitrid (TiN) kaplamanın mükemmel korozyon direncine sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca tek tabakalı kaplamaya göre hasar miktarını azaltarak aşınmaya karşı daha çok direnç sağlar (Holmberg & Matthews, 2009; Zhang & Jung, 2018).

**Gradyan kaplama:** Gradyan kaplamalar, alt tabakadan yüzeye hareket ederken bileşimlerin veya yapısal morfolojilerin sürekli değiştiği çok bileşenli bir kaplama türüdür. Bu da kaplamanın özelliklerini yüzeyden farklı derinliklerde değiştirme imkanı verir (Holmberg & Matthews, 2009).

**Çok tabakalı kaplama:** Belirtilen gradyan kaplamaların çoğu ve hatta nanokompozit olarak sınıflandırılan bazı kaplamalar aslında çok katmanlıdır. Tribolojik uygulamalar için PVD kaplamaların çok katmanlı olmasının (özellikle çok sayıda tekrarlanan katmanın kullanımı) faydaları vardır. Çok katmanlı kaplamaların avantajlı olmasının üç ana nedeni vardır:

- Arayüz katmanları: Bunlar, kaplamanın alt tabakaya yapışmasını iyileştirmek ve kaplama/alt tabaka sınırında kaplama özelliklerinden alt tabaka özelliklerine düzgün bir geçiş sağlamak için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Buna ek olarak, alt tabaka malzemesinin kaplama biriktirme prosesini etkilemesini engellemek, alt tabaka aşınmasını önleyici bir tabaka eklemek veya kaplama sistemindeki gözenek sayısını azaltmak gibi etkileri bulunmaktadır.
- Çok sayıda tekrarlanan katman: Çeşitli mekanik özelliklere sahip birkaç ince tabakanın birbiri üzerine yerleştirilmesiyle yüzey bölgesindeki gerilme yığılması ve çatlak ilerleme koşulları iyileştirilebilir.
- Farklı özellik katmanları: Yüzeyin özellikleri, korozyon koruması, aşınma koruması, termal izolasyon, elektrik iletkenliği, difüzyon bariyeri ve alt tabakaya

yapışma gibi yüzey üzerinde farklı türde etkilere sahip kaplama katmanlarının ayrı ayrı yerleştirilmesiyle geliştirilebilir (Holmberg & Matthews, 2009).

**Nano tabakalı kaplama:** Nano tabakalı kaplamalar, nanometre aralığındaki katman kalınlığı olan çok katmanlı bir kaplama türüdür. (Sousa & Silva, 2020) Bu tür kaplamalar, nano tabakalı TiN/VN kaplamalarda elde edilen çok yüksek sertlik artışından sonra araştırmacıların ilgi konusu olmuştur (Helmersson et al., 1987).

**Nanokompozit kaplama:** Nanokompozit kaplama, bir nanokristal faz ve bir amorf faz veya iki nanokristal faz olmak üzere en az iki fazdan oluşur. Kaplama tasarımına ve uygulamasına bağlı olarak sert, süper sert ve ultra sert olabilir. Geleneksel malzemelere ( $\geq 100$  nm) kıyasla daha küçük ( $\leq 10$  nm) tane boyutları nedeniyle geliştirilmiş özellikler gösterirler (Musil, 2012; Zhang et al.).

### 1.3.4. Kesici takımların kaplanması

Özellikle 1960'lardan beri sürekli olarak yüksek mukavemet ve tokluğa sahip yeni alaşımlar ve mühendislik malzemeleri geliştirilmektedir. Ancak bu malzemeler genellikle aşındırıcı ve takım malzemeleriyle kimyasal olarak tepkimeye açıktır. Malzemelerin verimli bir şekilde işlenmesindeki zorluk ve daha yaygın mühendislik malzemelerinin işlenmesinde performanslarının iyileştirilmesi ihtiyacı, kaplamalı takımlarda önemli gelişmelere yol açmıştır. Kaplamalı takımların kaplamasız takımlara göre üstünlükleri;

- Daha düşük sürtünme
- Aşınma ve çatlama karşı daha yüksek direnç
- Difüzyon bariyeri görevi görme
- Daha yüksek sıcak sertlik ve darbe dayanımı olarak sıralanabilir.

Kaplamalı takımlar, kaplamasız takımlardan 10 kat daha uzun ömürlü olabilir. Bu da yüksek kesme hızlarına izin vererek hem işleme operasyonları için gereken süreyi hem de üretim maliyetlerini azaltır. İşleme süresi 1900'lü yıllardan bu yana 100'den fazla faktör ile istikrarlı bir şekilde azaltılmıştır. Bu gelişme, modern takım tezgahlarının tasarımında, yapımında ve bunların bilgisayar kontrollerinde devam eden iyileştirmelerle

## 1. GİRİŞ

---

bağlantılı olarak işleme operasyonlarının ekonomisi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Sonuç olarak, kaplamalı takımlar günümüzde neredeyse tüm işleme operasyonlarında, özellikle tornalama, frezeleme ve delme işlemlerinin %40 ila 80'inde kullanılmaktadır (Kalpakjian & Schmid, 2009).

Nitrür esaslı kaplamalar, aşınmaya dayanıklı uygulamalarda, özellikle de sinterlenmiş karbür kesici takımların ve takım çeliklerinin yüzey özelliklerini iyileştirmede kullanılır. Titanyum nitrür (TiN) en sık kullanılan kaplamadır. Metalik yüzeyler üzerinde 1-12 µm kalınlık aralığındaki kaplamalar için ölçülen 17-30 GPa sertlik değerleri ile oldukça yüksek sertliğe sahiptir. Titanyum nitrürün tribolojik bir kaplama olarak uygunluğu, yüksek sertliği, çelik yüzeylere iyi yapışması ve iyi kimyasal stabilitesi ile açıklanmaktadır. Ticari olarak kullanımı çok yaygındır. Bunun dışında tribolojik uygulamalar için geliştirilmiş diğer nitrür kaplamalar olan titanyum karbonitrür (TiCN), hafniyum nitrür (HfN), titanyum alüminyum nitrür (TiAlN), titanyum zirkonyum nitrür (TiZrN) ve krom nitrür (CrN) kaplamalarının ana kullanım alanları kesici takımlar, şekillendirme takımları, türbin kanatları ve pompa bileşenleri olarak sınıflandırılabilir. Bu kaplamalar buhar biriktirme teknikleri ile uygulanmaktadır (Davis, 2001; Holmberg & Matthews, 2009).

Silisyum, özellikle ticari uygulamalardaki ince film kaplamalarında önemli bir konuma sahiptir. Silisyum içeriğinin artması adezif, abrazif ve yan kenar aşınmalarına karşı azaltıcı etkiye sahip olduğundan ince film kaplanmış kesici takımların kesme ömrü de buna bağlı olarak artar (Cai et al., 2019; Sousa et al., 2021). Kübik bor nitrür (c-BN) kaplamaların, taban malzemeler yüzeyine zayıf yapışma özelliğine sahip olması durumu silisyum nitrür (SiN) gibi bir ara katman uygulanarak önemli ölçüde iyileştirilebildiği yapılan çizik testi ile desteklenmiştir (Inagawa et al., 1989). Ayrıca CrCN kaplamasıyla karşılaştırıldığında, CrSiCN kaplamaları Si içermelerinin avantajıyla daha düşük bir sürtünme katsayısı sergilerler (Wu et al., 2016). Plazma biriktirme işleminde ise biriktirme hızını arttırmak için silisyum ilave edilir (Tracton, 2006).

### 1.4. Bilgisayar Destekli Üretim

İmalat teknolojisindeki gelişmeler, birçok endüstrideki üretim uygulamalarını yoğun iş gücü gerektiren yöntemlerden otomatikleştirilmiş ve bilgisayarlı yöntemlere yükseltmesine olanak sağlamıştır. Bu gelişmelerle birlikte, ürün kalitesinde bir iyileşme ile üretim döngüsü süresi ve maliyeti büyük ölçüde azaltılabilir. Son yıllarda bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli imalat (CAM), özellikle imalat sanayilerinde oldukça popüler hale gelmiştir. CAD/CAM kullanımı tasarım ve imalat aşamalarını birbirine bağlayarak üretim süresini kısaltmaktadır ve geleceğin fabrika tasarımına yönelik önemli bir adımdır (Leondes, 2003).

CAM, geniş bir faaliyet çeşitliliğini kapsar. En alt düzeyde, bireysel süreçlerin veya bir grup sürecin otomasyonu, mikroişlemciler, programlanabilir mantık denetleyicileri (PLC) ve mikro denetleyiciler tarafından sağlanabilir. Bilgisayarlar veya mikroişlemciler, takım tezgâhları, kaynak makineleri, montaj makineleri vb. imalat ekipmanlarını kontrol edebilir. Takım tezgahlarında kullanılan kontrol tipine bilgisayar destekli sayısal kontrol (CNC) denir. CNC, programlanabilir mantık denetleyicisinin (PLC) kullanımını da içerebilir. Bir esnek üretim hücresi, içinde daha yüksek düzeyde bilgisayar kontrollü otomasyon bulunan bir veya daha fazla takım tezgahından oluşabilir. Bilgisayar destekli sayısal kontrolün (CNC) avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Son derece hızlı parça işleme
- CAD sistemiyle sorunsuz entegrasyon
- Operatör kontrol ara yüzleri (Radhakrishnan, 2015).

#### 1.4.1. SolidCAM 2.5 eksen modülü

SolidCAM yazılımı ile bütünleşen ve klasik kesim stratejisi olarak da bilinen 2.5 eksen modülü, son teknoloji takım yolları kullanarak CNC frezeleme işleminde takım yolları oluşturup parça işlemede kolaylık sağlayan bir operasyondur. Hem manuel hem de otomatik işleme opsiyonlarını beraber sunarak otomatik havuz, delik tanıma, detaylı parametre, geometri ve işleme stratejisi seçimi imkânı verebilmektedir. Ayrıca iş parçasının geometrik şekillerine göre döngü kütüphanesinde bulunan standart olarak

## 1. GİRİŞ

---

belirlenmiş döngüleri seçerek parçaya çok daha hızlı CAM yapabilme olanağı tanımaktadır. 2.5 eksen modülü; profil, havuz ve delik işlemlerinin yanında birçok önemli işleme seçenekleri de sunmaktadır. Bunlar:

- İşlenecek kontürün manuel olarak değiştirilebilmesi
- Bir önceki takımdan kalan talaşın otomatik şekilde hesaplanarak işlenmesi
- Profil ve havuz operasyonunda tanımlanmış olan geometriye göre pah işleyebilmesi
- Standartlara göre iç ya da dış diş açabilmesi
- Yazıları düz yüzeylere ya da formlu yüzeylere sararak işleyebilmesi
- Parçayı farklı derinliklerde işlemek için 3D kontur seçebilmesi
- Doğrusal hareketi aksenal harekete çevirerek döner eksenle sarmal işleme yapabilmesi (Anonim, 2021a).

### 1.4.2. SolidCAM iMachining modülü

SolidCAM yazılımı içerisinde yer alan ve yeni nesil kesim stratejisi olarak bilinen iMachining modülü işleme zamanından tasarruf sağlayan bir takım yolu optimizasyon teknolojisidir. iMachining teknoloji sihirbazı ise takım yollarını ve kesme şartlarını otomatik olarak belirleyebilen bu alandaki ilk ve tek teknoloji olarak bilinir. iMachining Teknolojisi; kesici takım, iş parçası malzemesi ve CNC tezgâh özelliklerini dikkate alarak devir ve ilerlemelerin otomatik olarak belirlenmesini sağlar. Kontrollü yanal adım teknolojisi, iMachining sihirbazının önerdiği kesme şartlarının işleme süresince korunmasını sağlayabilmekte ve kesme şartlarında deneme yanılma sürecini ortadan kaldırarak tek seferde en iyi ve en uygun çözümü sunabilmektedir. iMachining modülünün öne çıkan özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Daha kısa işleme süresi ile artan üretim verimliliği
- Kesici takım ömrünün artması
- Standart dışı sert malzemelerin işlenebilmesi
- Küçük çaplı takımların performansında artış sağlanması
- Teknoloji sihirbazı ara yüzü ile otomatik ilerleme ve kesme hızları

- Programlama verimliliğinin artmasıdır (Anonim, 2021b).



### 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Talaşlı imalat işlemleri kesici takımlar kullanılarak gerçekleştirilir. İşleme sırasındaki yüksek kuvvetler ve sıcaklıklar, takımlar için çok zorlu bir ortam oluşturur. Kesme kuvveti çok yükselirse takım kırılır. Kesme sıcaklığı çok yükselirse, takım malzemesi yumuşar ve bozulur. Bu koşullardan hiçbiri takımın hasara uğramasına neden olmazsa, kesme kenarının sürekli aşınması kesici takımın işlevini yerine getirememesine yol açar (Groover, 2019).

İnce film kaplanmış sert metal kesici takımlar, kaplanmamış takımlara göre işleme performanslarını iyileştirmektedirler. Kaplanmamış takımlar için kullanılan aynı kesme hızlarında kullanıldıklarında, hasar süresi ve takım maliyetlerinde tasarruf sağlamaktadırlar. Bunun yanı sıra kaplanmamış sert metal kesici takımlardan daha yüksek hızlarda kesime izin vermeleri ve dolayısıyla belirli bir sürede çok daha fazla parça üretilebilmesi diğer avantajlarından (Edwards, 1993).

Chang et al., WC-Co taban malzemesi üzerine katodik ark fiziksel buhar kaplama ile biriktirilen TiSiN/TiAlN çok katmanlı kaplamanın özelliklerini ve performansını araştırmışlardır. Çok katmanlı TiSiN/TiAlN kaplamaların tek katmanlı TiAlN kaplamalardan daha iyi korozyon direnci gösterdiğini bulmuşlardır. Bu durumun gelişmiş mekanik, aşınma ve korozyon özelliklerinden dolayı film yapısındaki lamel kalınlıklarına bağlı olduğu sonucuna varmışlardır (Chang et al., 2007).

Kulkarni and Sargade, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kuru tornalanması sırasında PVD çok katmanlı TiN/TiAlN ve TiAlN/TiSiN kaplamalı sinterlenmiş karbür insert uçların performansını incelemiştir. TiN/TiAlN kaplamasını KAFBK tekniğini kullanarak, TiAlN/TiSiN kaplamasını ise magnetron sıçratma tekniğini kullanarak biriktirmişlerdir. TiAlN/TiSiN kaplı takımın, mikrosertliğinin ve taban malzemeye olan adezyonunun daha iyi olmasından dolayı TiN/TiAlN kaplı takıma göre performansının daha yüksek olduğu ve daha düşük kesme kuvvetleri sergilediği tespit edilmiştir (Kulkarni & Sargade, 2013).

Chinchanikar and Choudhury, magnetron sıçratma tekniği ile kaplanmış nanokompozit AlTiN, nanokompozit çok katmanlı TiAlN/TiSiN ve nanokristal AlTiCrN kaplamalı karbür takımların sert tornalamaya uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Deneysel gözlemlerinde, nanokristal AlTiCrN kaplı karbür takımların daha iyi soğutma ve yağlama işlemleri sayesinde daha yüksek takım ömrünü işaret ettiğini ve bu takımların AISI 4340 alaşımlı çeliğin sert tornalaması için iyi bir potansiyele sahip olduğunu ifade etmişlerdir (Chinchanikar & Choudhury, 2014).

Wang et al., sertleştirilmiş çeliğin iki tip PVD kaplı karbür takım (TiSiN ve TiAlN) kullanılarak yüksek hızda frezelenmesi sırasında kesici takım aşınma ve kırılma mekanizmasını ve bunların etkilerini incelemek için araştırma yapmışlardır. TiSiN ile kaplanmış kesici takımların ömürlerinin daha yüksek mikrosertlikleri sayesinde ve buna bağlı olarak daha az abrazif aşınmaya maruz kalmalarıyla TiAlN ile kaplanmış takımlardan daha uzun olduğu sonucuna varmışlardır (Wang et al., 2015).

Kumar and Patel, kuru kesme ortamında AISI 52100 sertleştirilmiş çeliğin tornalanmasında  $Al_2O_3/TiCN$  seramik insert uçlar üzerine nanokompozit TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamanın performans analizini ve karşılaştırmalı değerlendirmesini yapmışlardır. Tek katmanlı AlCrN ve çok katmanlı AlTiN kaplamalarını katodik ark fiziksel buhar kaplama işlemi ile nano yapılı TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamasını ise magnetron sıçratma işlemi kullanarak biriktirmişlerdir. Katodik ark fiziksel buhar kaplama işleminin damlacıklar ve ara boşluklar gibi yüzey kusurlarına neden olduğu, magnetron sıçratma işleminin ise AlTiN ve AlCrN kaplamalarla karşılaştırıldığında TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamanın üstün performansı ile damlacıksız bir yüzey oluştuğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamadaki nanoyapının, kaplamanın pullanmasını veya soyulmasını önlediğini ve amorf yapısı sayesinde üstün aşınma direnci davranışı sergilediğini tespit etmişlerdir (Kumar & Patel, 2018).

Weicheng et al., YT15 sinterlenmiş karbür üzerine yüksek sıcaklıklarda katodik ark iyon kaplı TiAlN ve TiSiN kaplamaların mikroyapı ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlarda, TiAlN kaplamanın daha az sürtünme kuvveti ve daha yüksek

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

sertlik ile taban malzemeye bağlanma gücünün daha fazla olmasından dolayı aşınma direncinin TiSiN kaplamadan daha iyi olduğunu saptamışlardır (Weicheng et al., 2018).

Sousa et al., önceden sertleştirilmiş takım çeliğinin frezeleme işlemlerinde TiAlSiN ve TiAlN PVD kaplı takımların aşınma davranışını incelemiştir. TiAlSiN kaplı takımların, TiAlN kaplı takımlara kıyasla Si eklenmesinin bir avantajı olarak daha az yan kenar aşınmasına maruz kaldığını görmüşlerdir (Sousa et al., 2021).

Polcar and Cavaleiro, WC taban malzemesi üzerine CrAlN, CrAlSiN ve AlCrSiN kaplamalarını katodik ark fiziksel buhar kaplama yöntemi ile büyütürük yüksek sıcaklıklardaki tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Her üç kaplamanın da çok iyi termal kararlılıkta ve 800 °C'ye kadar oksidasyon direncine sahip olduğunu görmüşlerdir. Tribolojik özelliklerin tespiti için 25-600 °C sıcaklık aralığında ball-on-disk yöntemiyle karşı bilye malzemesi olarak alümina ve paslanmaz çelik bilyeler kullanmışlardır. Paslanmaz çelik bilyelerin yüksek oranda aşındığı, bilye malzemesinin kaplamaların yüzeyine aktarılmasına neden olduğu ve kaplamaların hasara uğramadığı, alümina bilyelerde ise 300 °C'ye kadar olan test sıcaklıklarında kaplama aşınmasının oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. 400 °C'de CrAlSiN kaplamanın kısmen aşındığı, CrAlN ve AlCrSiN kaplamaların ise 600 °C'de hemen aşındığı gözlenmiştir. Ayrıca aşınma debriyelerinin analizi ile kaplamaların yüksek sıcaklıkta adezif aşınmaya maruz kaldığı tespit edilmiştir (Polcar & Cavaleiro, 2011a).

Kim et al., AlCrSiN kaplı yüzeylerin tribolojik performansını iyileştirmek için lazer yüzey tekstür uygulaması üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, H13 çelik altlık üzerinde iki farklı lazer yüzey dokusu deseni gerçekleştirmişler ve dokulu H13 numuneleri üzerinde dengesiz magnetron sıçratma ile çeşitli N<sub>2</sub> içeriklerine sahip AlCrSiN kaplamalar uygulamışlardır. AlCrSiN filmlerinin sertliğinin, artan N<sub>2</sub> kısmi basınçları ile arttığını, 0.42 olan dokusuz AlCrSiN filmlerinin ortalama sürtünme katsayısının, çukur dokulu ve petek dokulu AlCrSiN filmler için sırasıyla 0.38 ve 0.36'ya düştüğünü gözlemlemişlerdir (Kim et al., 2012).

Wu et al, AlCrN kaplama ve AlCrSiN çok katmanlı ve nanokompozit kaplamaları yüksek hız çeliği (HSS) kesici takımların yüzeyine büyütürük mekanik ve tribolojik

özelliklerini incelemişlerdir. Daha yüksek sertlik ve daha düşük yüzey pürüzlülüğünün bir sonucu olarak AlCrSiN kaplı takımındaki aşınma kaybının, AlCrN kaplı takımdan daha az olduğunu ve takım ömrünün AlCrN'e göre % 40 daha uzun olduğunu tespit etmişlerdir (Wu et al., 2015).

Chen et al., AlCrSiN bazlı kaplamaların yapısını ve aşınma davranışını gözlemlemişlerdir. AlCrN, AlCrSiCN, AlCrSiN/MoN ve AlCrSiN/NbN kaplamaları, Ar/N<sub>2</sub> karışımlarında orta frekanslı magnetron sıçratma tekniği ile yüksek cilalı WC-Co taban malzemesi ve kesici takımlar üzerine büyütmüşlerdir. Kaplamalarda kübik yapının oluştuğunu görmüşlerdir. SEM görüntülerinde AlCrN kaplamanın sütunlu bir yapı sergilediğini, AlCrSiCN, AlCrSiN/MoN ve AlCrSiN/NbN kaplamalarının ise nanokristal yapı gösterdiğini gözlemlemişlerdir. AlCrN kaplama ile karşılaştırdıklarında, nano-çok katmanlı kaplamaların daha yüksek sertlik ve daha iyi aşınma direncine sahip olduğunu belirlemişlerdir (Chen et al., 2016).

Zhang et al., katodik ark iyon kaplama yöntemi ile AlTiN ve AlTiN/AlCrSiN kaplamaların tribolojik özellikleri, oksidasyon direnci ve tornalama performansını incelemişlerdir. AlTiN/AlCrSiN kaplamalı insert ucun AlTiN kaplamalı insert uca kıyasla daha yüksek sertlik ve adezyon gücüne sahip olmasının bir sonucu olarak daha uzun bir kullanım ömrü sergilediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca AlCrSiN ara katmanlarının eklenmesiyle, AlTiN'ün oksidasyona karşı direncini önemli ölçüde artırdığı sonucuna varmışlardır (Zhang et al., 2018).

Y. Liu et al., AlTiSiN ve AlCrSiN kaplamaların yüksek sıcaklıktaki oksidasyon davranışlarını araştırmışlardır. Sonuçlarda, AlCrSiN kaplamanın yüzeyinde ve iç tarafında kaplanmış yoğun Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve ince Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filmleri sayesinde, yüksek sıcaklıkta AlTiSiN kaplamaya göre oksidasyondan daha iyi koruyabildiğini bulmuşlardır (Y. Liu et al., 2019).

Z. R. Liu et al., katodik ark fiziksel buhar kaplama yöntemi ile biriktirilen AlCrSiN kaplamalara Ni ilavesinin mekanik, tribolojik özellikler ve oksidasyon direnci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Ni içeriğinin artmasıyla, çok fazlı kompozit yapılı AlCrSiN-Ni kaplamaların sertlikte, elastisite modülünde ve sertliğin modüle oranında

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

sürekli bir düşüş olduğu ve bu düşüşün de oda sıcaklığında ve 600°C'de aşınma direncinin azalmasına neden olduğu sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte Ni ilavesinin 600°C'de tokluğu etkili bir şekilde arttırdığını ve sürtünmeyi azalttığını gözlemlemişlerdir. Ni içeren kaplamalarda Cr'un dışı doğru daha hızlı difüzyonu, daha az koruma etkisi ve zayıf yapışma ile  $Cr_2O_3/NiAl_2O_4$  iki katmanlı oksit oluşturduğunu, bunun da düşük oksidasyon direncine yol açtığını görmüşlerdir (Z. R. Liu et al., 2019).

Chang and Amrutwar, SKH9 yüksek hız takım çeliği üzerine uyguladıkları plazma nitrüleme ön işleminden sonra katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile gradyan AlCrSiN kaplamasını büyütürken takım çeliklerinin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Sonuçlarda, büyütülen AlCrSiN kaplaması için aşınma direncinin artan sertlik desteği sayesinde arttığını görmüşlerdir (Chang & Amrutwar, 2019).

Cai et al., farklı oranlarda Si içeren ve kesici takımlar üzerinde büyütülen AlCrSiN gradyan kaplamaların kesme performansını incelemişlerdir. Sonuçlarda, Si içeriğinin artışı adeziv ve abrazif aşınmaya karşı azaltıcı etkiye sahip olduğundan AlCrSiN kaplanmış kesici takımların kesme ömrünün de arttığını bulmuşlardır (Cai et al., 2019).

Gautier et al., uçak bileşenleri için nanokompozit kaplamaların aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, genellikle iniş takımı uygulaması için kullanılan bir yüksek hız çeliği (H11) üzerine PVD ile kaplanmış iki seramik çok katmanlı kaplama olan AlSiTiN ve AlSiCrN'nin erozyon direncini araştırmışlardır. Sonuçlarda AlSiCrN kaplamanın, AlSiTiN kaplamaya göre daha yüksek direnç göstererek, H11 taban malzemenin erozyon direncini önemli ölçüde arttırdığını bulmuşlardır. Bunun nedenini de uyguladıkları çizik testinde AlSiCrN kaplamanın taban malzemeye daha iyi adezyon eğilimi şeklinde açıklamışlardır (Gautier et al., 2019).

Drozd et al., AlCrSiN kaplı K340 takım çeliğinin popüler takım çeliği kalitelerine karşı tribolojik davranışını incelemişlerdir. Yaptıkları SEM analizinde kaplamasız takım çeliklerinde gözlemledikleri sert adeziv-abrazif aşınma mekanizmasının aksine, AlCrSiN kaplamalı takımda abrazif aşınmanın baskın olduğunu görmüşlerdir. Sonuç olarak AlCrSiN kaplamanın K340 takım çeliğinin aşınmasını azalttığını, kayma özelliklerini

iyileştirdiğini ve bunun sayesinde de takım ömrünü arttırdığını bulmuşlardır (Drozd et al., 2020).

Wang et al., katodik ark fiziksel buhar biriktirme ve magnetron sıçratma tekniklerini birleştirerek hibrit biriktirme sistemi ile büyüttükleri AlCrSiN kaplamalarına V ilavesinin mikroyapı, mekanik, oksidasyon ve tribolojik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. V içeriğinin artmasıyla mikro yapının yoğun yapıdan sütunlu yapıya geçtiğini, sertliğin önce yükselip daha sonra düştüğünü, oksidasyon sürecinin hızlanması nedeniyle 600 °C ve 800 °C’de sürtünme katsayılarında keskin bir düşüş yaşandığını görmüşlerdir (Wang et al., 2021).

Literatürde yapılan nitrür bazlı ince film kaplanmış malzemelerin aşınma performanslarının incelendiği çalışmalar dikkate alındığında, çift tabakalı TiAlN/TiSiN ve tek tabakalı AlCrSiN ile kaplanmış malzemelerin aşınma performanslarının karşılaştırmalı olarak incelendiği bir çalışma tespit edilmemiştir. Ayrıca bu filmlerin kaplandığı çalışmalar dikkate alındığında, kaplamaların genel olarak standart deney numuneleri üzerinde karakterize edildiği görülmektedir. Bu tez çalışmasında ise kaplanmış ve kaplanmamış kesici takımların plastik enjeksiyon kalıp çeliğinin talaşlı imalatta hem klasik kesim hem de yeni nesil kesim stratejileriyle işlenerek karşılaştırılıp gerçek çalışma performansları değerlendirilerek çok daha tutarlı sonuçların elde edilmesi hedeflenmiştir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Bu tez çalışmasında tungsten karbür (WC), taban malzeme olarak kullanılmıştır. Tungsten karbür silindirik deney numuneleri ve kesici takımlar, Katodik Ark Fiziksel Buhar Kaplama (KAFBK) yöntemi ile çift tabakalı TiAlN/TiSiN ve tek tabakalı AlCrSiN ince filmleri ile kaplanmıştır. Kaplama parametreleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Uygulanan kaplamaların mekanik, tribolojik ve yapısal özellikleri deney numuneleri üzerinde yapılan testlerle belirlenmiştir.

Çizelge 3.1. Kaplama parametreleri

	TiAlN/TiSiN	AlCrSiN
Parametreler	Değerler	Değerler
Bias (V)	100	100
Katot Akımı (A)	140	140
Basınç (mbar)	$4.5 \times 10^{-2}$	$4.5 \times 10^{-2}$
Sıcaklık (°C)	450	450
Hedef Kompozisyonu	Ti <sub>0.5</sub> Al <sub>0.5</sub> / Ti <sub>0.8</sub> Si <sub>0.2</sub>	Al <sub>0.63</sub> Cr <sub>0.34</sub> Si <sub>0.03</sub>
N <sub>2</sub> debisi (cm <sup>3</sup> /dak.)	1000	1000
Kaplama Süreleri	TiAlN-5 dak. kaplama- bias 50V TiAlN-50 dak. kaplama- bias 100V TiSiN-20 dak. kaplama- bias 100V	AlCrSiN-5 dak. kaplama- bias 50V AlCrSiN-70 dak. kaplama- bias 100V



Şekil 3.1. Silindirik test numuneleri

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Kaplamaların yapısal ve tribolojik özelliklerinin karakterizasyonu, 14 mm çapında ve 9 mm yüksekliğindeki Şekil 3.1’de gösterilen işlemsiz sinterlenmiş karbür, çift tabakalı TiAlN/TiSiN ve tek tabakalı AlCrSiN ince film kaplanmış silindirik test numuneleri ile gerçekleştirilmiştir. Büyütülen kaplamaların talaşlı imalat performanslarının belirlenmesi için, Şekil 3.2’de verilen 12 mm çapında işlemsiz ve kaplanmış tungsten karbür parmak frezeler kullanılmıştır.



Şekil 3.2. İşlemsiz ve kaplanmış karbür parmak frezeler

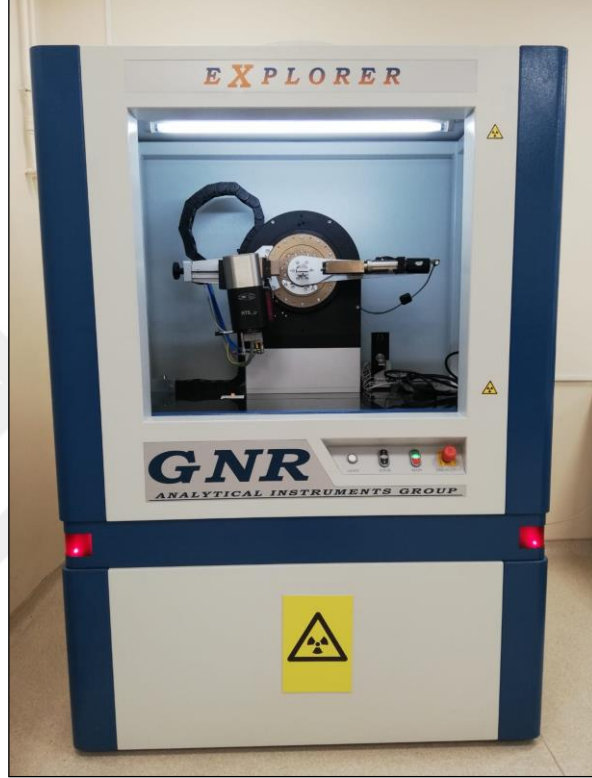
İş parçası olarak ise 105x105x43 mm ölçülerine sahip 40CrMnNiMo8-6-4 plastik enjeksiyon kalıp çeliği (Impax çeliği) kullanılmıştır. İş parçasının kimyasal bileşimi Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Plastik enjeksiyon kalıp çeliği (impax çeliği) kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşim	C	Mn	Cr	Ni	Mo
% Dağılım	0.40	1.50	1.90	1.0	0.20

#### 3.2. X Işını Kırınımı (XRD) Analizi

Kaplanmış numune yüzeyinde oluşan fazlar  $\lambda=1,5405 \text{ \AA}$  dalga boyunda Cu-K $\alpha$  radyasyonu kullanılarak GNR-Explorer XRD cihazı aracılığı ile belirlenmiştir (Şekil 3.3). Ölçümler  $20^\circ$ - $80^\circ$  aralığında saniyede  $0,05^\circ$ 'lik adımlarla simetrik bir tarama ile gerçekleştirilmiş, pikler Match yazılımı ve literatür ile karşılaştırılarak bulunmuştur.



Şekil 3.3. X ışını kırınımı (XRD) cihazı

#### 3.3. Aşınma Deneyleri

Kullanılan numunelerin aşınma deneyleri Şekil 3.4'te verilen Bruker-UMT (Bruker Universal Mechanical Tester) tribometre test cihazı ile yapılmıştır. Aşınma deneylerinde kullanılan parametreler Çizelge 3.3'te verilmiştir. Kaplanmış ve işlemsiz numunelerin aşınma oranlarının hesaplanmasında 3.1 olarak numaralandırılan formül kullanılmıştır.

$$\text{Aşınma Oranı} \left( \frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right) = \frac{\text{Aşındırılan Hacim} (\text{mm}^3)}{\text{Uygulanan Yük} (N) \cdot \text{Aşınma Mesafesi} (m)} \quad (3.1)$$

**Çizelge 3.3.** Aşınma deneyi parametreleri

Test Parametreleri	Değerler
Test türü	İleri-Geri (Reciprocating)
Uygulanan yük (N)	30
Aşınma stroğu (mm)	4
Aşındırma hızı (mm/s)	8
Aşındırma süresi (s)	3600
Karşı bilye malzemesi	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Sıcaklık (°C)	Oda sıcaklığı (23±2)
Ortam	Kuru şartlar



**Şekil 3.4.** Tribometre test cihazı

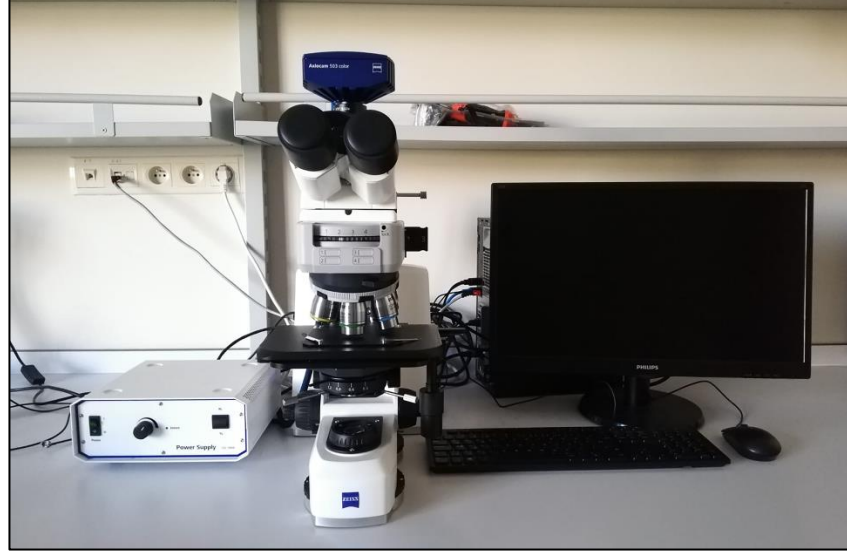
Kaplanmış ve işlemsiz kesici takımlardaki aşınmaların tespiti için klasik ve yeni nesil kesim ile gerçekleştirilen frezeleme işlemleri sonrası yan kenar aşınma (flank wear) genişlikleri dikkate alınmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Kesici takımdaki yan kenar aşınma bölgesi

#### 3.4. Çizik Testi ve Kritik Yük Analizi

Çizik testi için Şekil 3.4'te verilen Bruker-UMT (Bruker Universal Mechanical Tester) tribometre test cihazı kullanılmıştır. Bu sayede kaplamaların sinterlenmiş karbür taban malzemesine olan adezyonu tespit edilmiştir. Kaplamaların taban malzemedan tamamen ayrıldığı yük değeri olarak alınan kritik yük değerleri ( $L_c$ ), 0.2 mm uç yarıçaplı ve 120° konik açılı elmas Rockwell C batıcı uçla, kaplama uygulanan numune yüzeyinde 150 N/dakika yükleme ile 10 mm/dakika kayma hızında hareket ettirilerek saptanmıştır. Test sonrası çizik izlerinin görüntüleri Şekil 3.6'da verilen ZEISS Axiocam 503 Color optik mikroskop cihazı yardımıyla alınarak birleştirilmiştir. Birleştirilen görüntüler üzerinde kaplamaların taban malzemedan tamamen ayrıldığı bölgeler belirlenerek kritik yük değerleri bulunmuştur.



Şekil 3.6. Optik mikroskop cihazı

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

Kaplanmış numunelerin yüzey görüntüleri, kaplama kalınlıklarını belirlemek için kesit görüntüleri, aşınma izleri ile işlemsiz, çift katmanlı TiAlN/TiSiN ve tek katmanlı AlCrSiN kaplanmış kesici takımlarla yapılan frezeleme işlemi sonrası takım üzerinde oluşan yan kenar aşınma genişlikleri, FEI QUANTA-FEG 250 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

#### 3.6. 3D Yüzey Profilometre Analizleri

Aşınma testleri sonrası deney numunelerindeki aşınma oranlarının hesaplanması ve klasik kesim ile yeni nesil kesim işleminde kullanılan kesici takımların iş parçası üzerinde meydana getirdiği yüzey pürüzlülüğü değerlerinin belirlenmesi amacıyla Şekil 3.8'de belirtilen Bruker Contour GT markalı 3D profilometre cihazı kullanılmıştır. Her bir aşınma izinden 10 ölçüm alınmıştır. Aşınma izi kesit alanı ile iz uzunluğu çarpımı sonucu elde edilen aşınma hacmi, toplam aşınan mesafe ile uygulanan kuvvetin çarpımına bölünerek aşınma oranı belirlenmiştir.



Şekil 3.8. 3D Profilometre cihazı

#### 3.7. Mikrosertlik Ölçümleri

Deney numunelerinin mikrosertlik değerlerini belirlemek için SHIMADZU HMV-G20 mikro sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. (Şekil 3.9) Ölçümler, Vickers metodu yardımıyla 100 gram yük altında ve 10 saniye bekleme süresi ile her bir deney numunesinin farklı noktalarından 10 adet ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.9.** Mikrosertlik ölçüm cihazı

#### 3.8. Kütle Kaybı Analizi

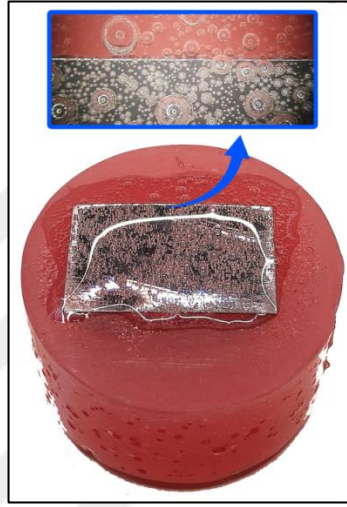
Talaşlı imalat işleminde kullanılan freze takımlarının kütle kaybı analizi için hem işlem öncesi hem de işlem sonrası kesici takımlar ultrasonik yıkama yapılarak Şekil 3.10'da sunulan AXIS elektronik hassas laboratuvar terazisi yardımıyla tartılmıştır.



**Şekil 3.10.** Elektronik hassas laboratuvar terazisi

#### 3.9. Dağlama İşlemi ve Kaplama Kalınlığı Analizi

Kaplama kalınlığının belirlenebilmesi için kesitleri alınan TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN ince film kaplanmış deney numuneleri zımparalanıp parlatıldıktan sonra 1 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Sülfürik Asit) ve 3 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Hidrojen Peroksit) çözeltisiyle 10 dakika boyunca dağlanmıştır (Şekil 3.11). Dağlama işlemi sonrası Şekil 3.7’de verilen SEM yardımıyla numunelerin kesit görüntüleri alınarak kaplama kalınlıkları belirlenmiştir.



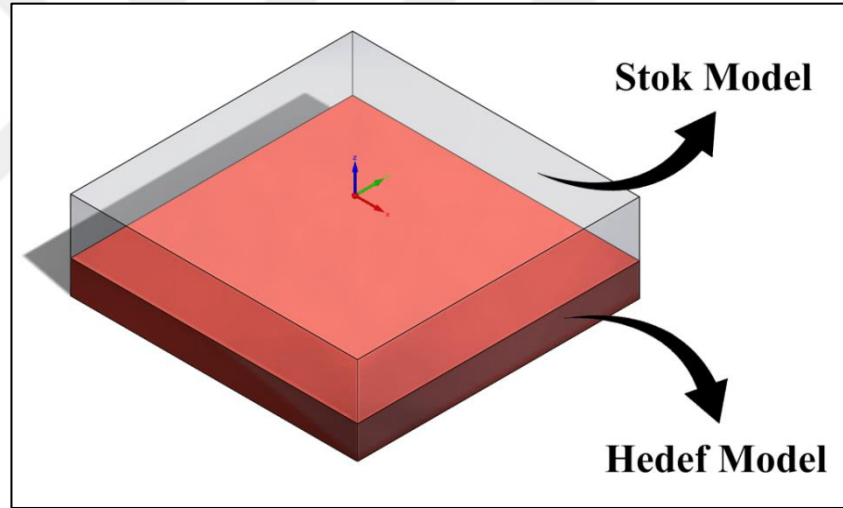
Şekil 3.11. Dağlama işlemi görüntüsü

#### 3.10. Klasik Kesim ve Yeni Nesil Kesim Stratejisi

Bu tez çalışmasında plastik enjeksiyon kalıp çeliğinden (Impax çeliği) imal edilmiş iş parçaları Şekil 3.12’de verilen Haas-VF2 üç eksenli CNC dik işleme merkezinde SolidCAM 2,5 eksen ve iMachining modülleri kullanılarak işlenmiştir. Kullanılan iş parçasının geometrisi prizmatik olup, 105x105x43 mm ölçülerindedir. SolidCAM yazılımı kullanılarak tanımlanan stok ve hedef model Şekil 3.13’te gösterilmiştir.

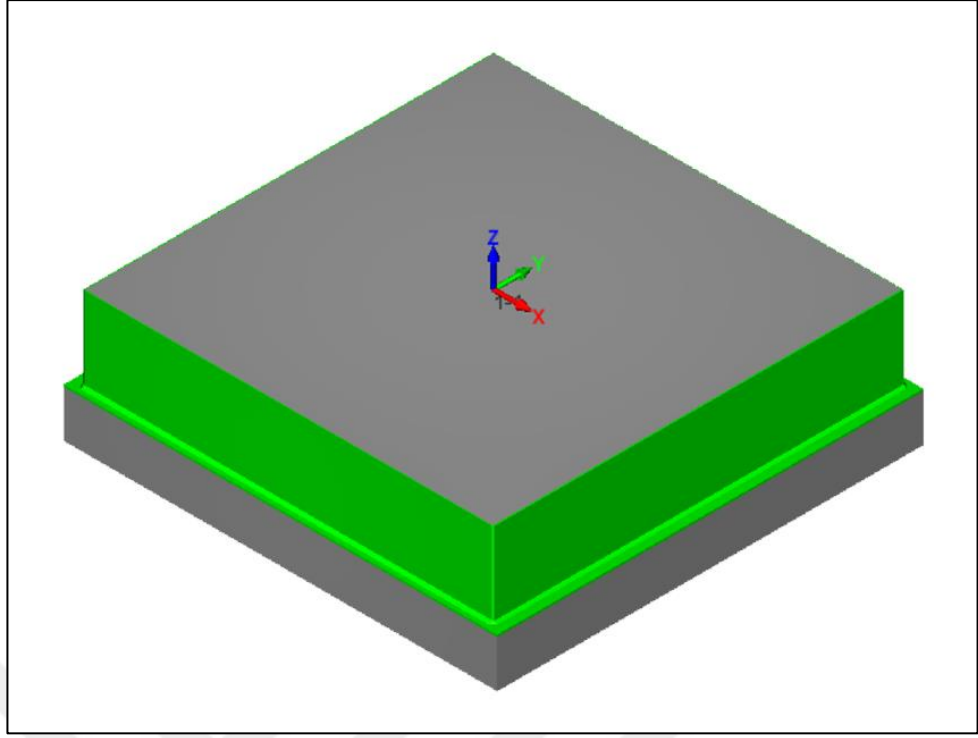


Şekil 3.12. Üç eksenli CNC dik işleme merkezi



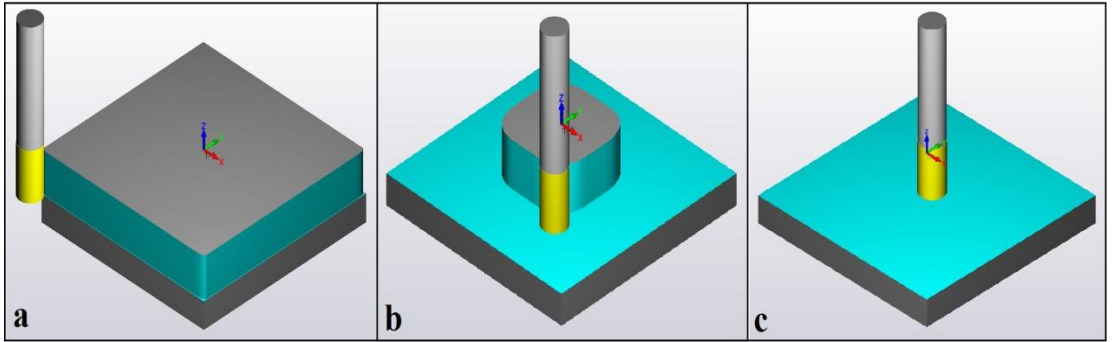
Şekil 3.13. CAM yazılımında tanımlanan stok ve hedef model

İşlemsiz sinterlenmiş karbür, TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN ile kaplanmış kesici takımların gerçek çalışma performanslarının doğru biçimde saptanması ve karşılaştırılabilmesi için kütük parça etrafından karşılaştırma yapılacak kesici takımların haricindeki farklı bir takım aracılığıyla bir miktar talaş kaldırılıp iş parçasının yeni ölçüleri 99x99x20 mm olarak belirlenmiştir. Talaşlı imalatta kullanılan iş parçası Şekil 3.14’te gösterilmiştir.



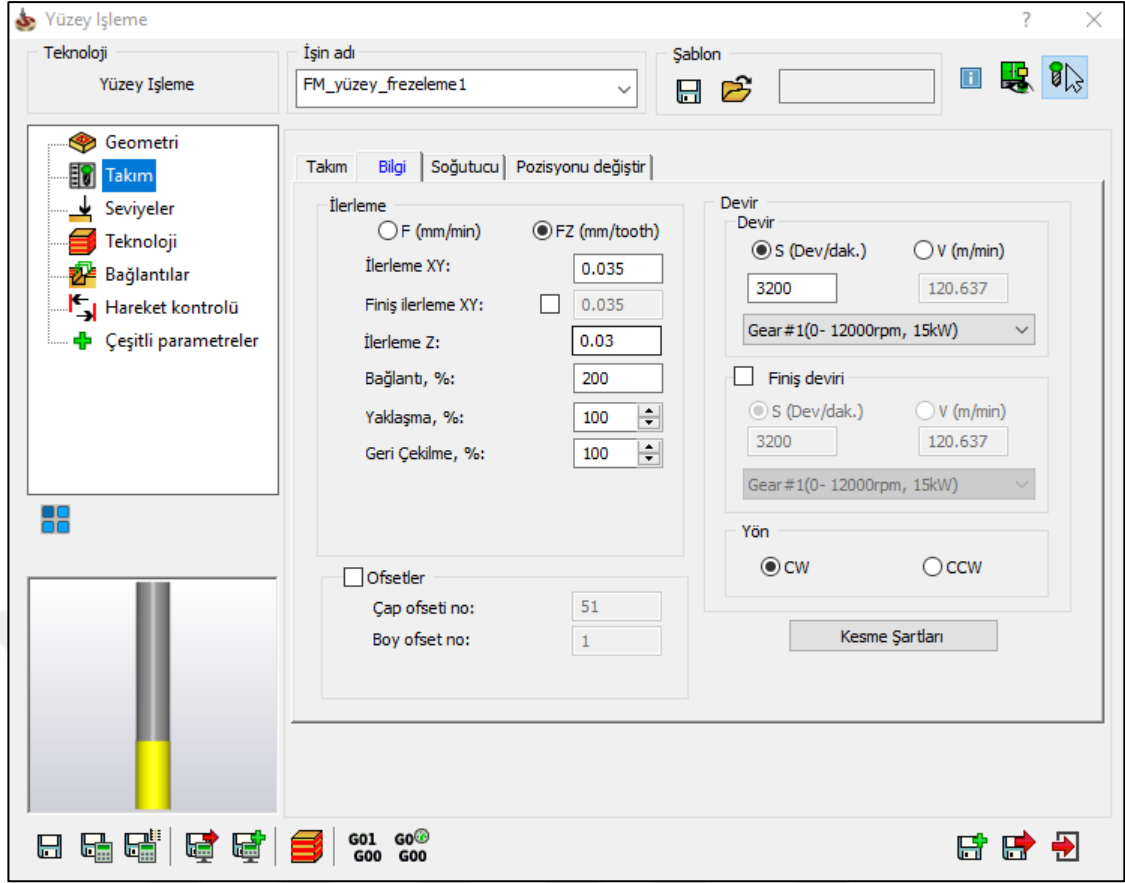
**Şekil 3.14.** Talaşlı imalatta kullanılan iş parçası

Üç eksenli CNC dik işleme merkezinde 2,5 eksen ve iMachining modülleri ile gerçekleştirilen işlemlere ait SolidCAM simülasyon aşamaları Şekil 3.15’te verilmiştir. Her iki modüldeki işlem aşamaları aynı olup, kesme parametreleri farklıdır.



**Şekil 3.15.** SolidCAM simülasyon aşamaları

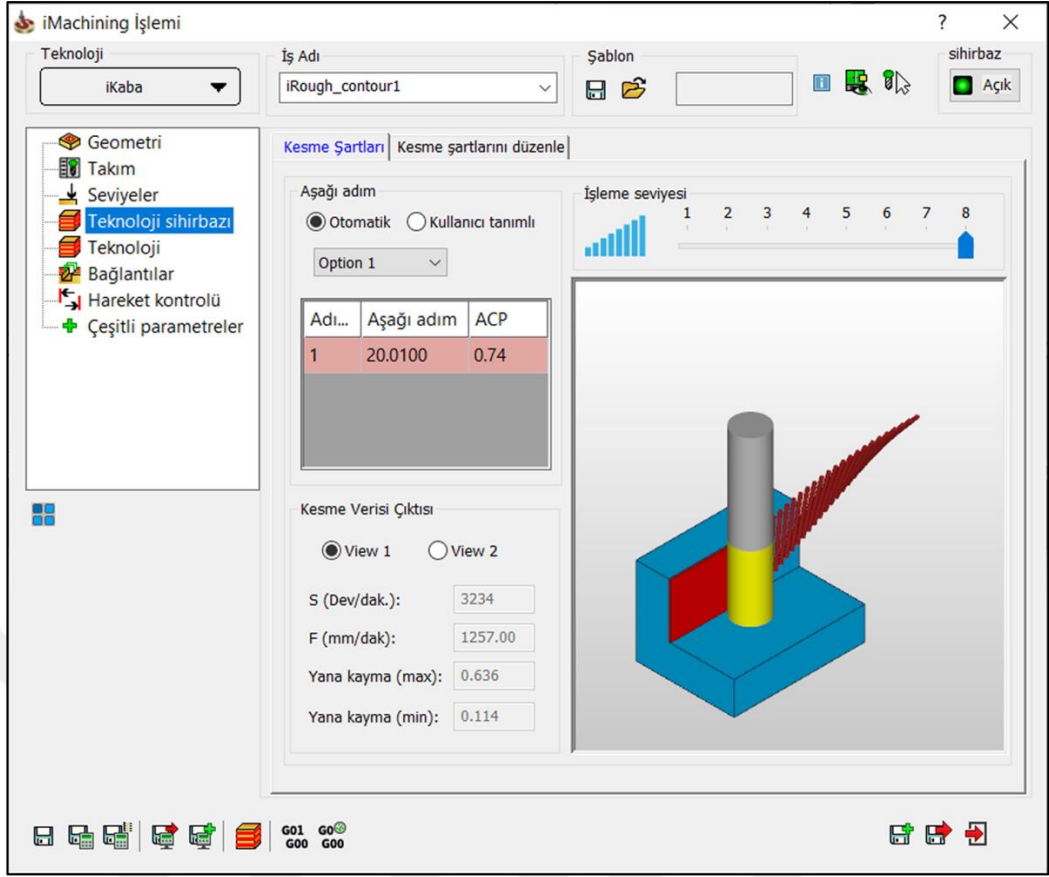
### 3. MATERYAL ve YÖNTEM



Şekil 3.16. 2,5 eksen modülünde kullanılan kesme parametreleri

CAM yazılımında kullanılan 2,5 eksen modülü için kesme parametreleri Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kesme parametrelerinden olan devir sayısı (S) 3.200 dev/dak, ilerleme hızı (F) 0,035 mm/diş ve yana kayma değeri ise takım çapının %2,5'i (0,3 mm) alınmıştır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM



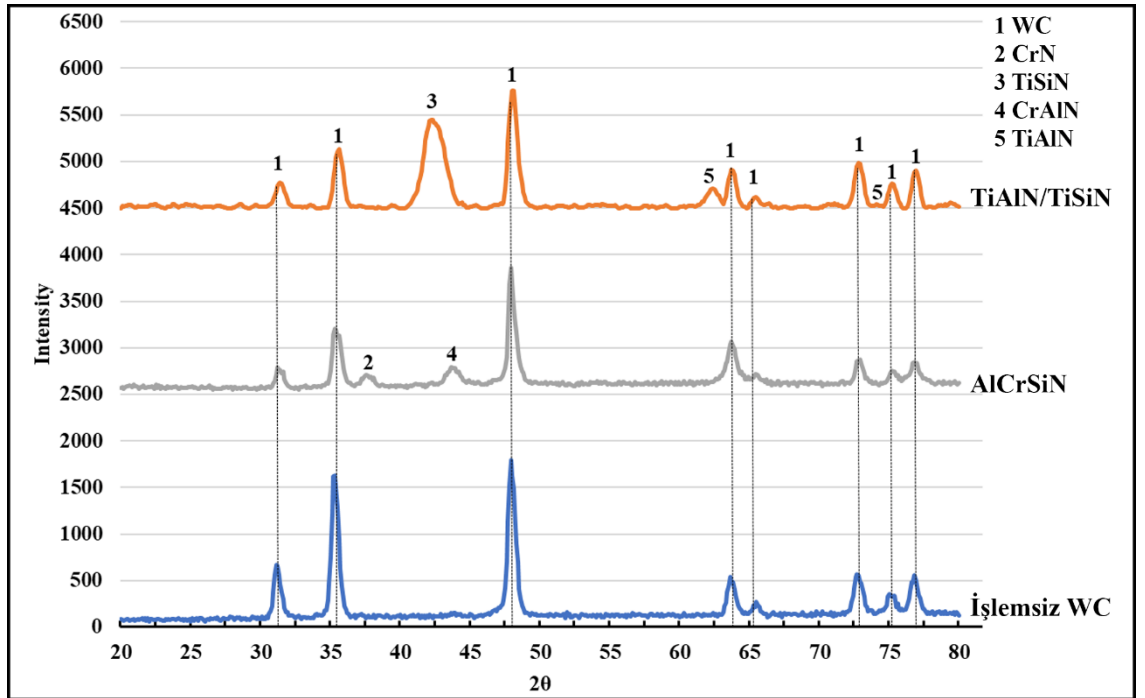
Şekil 3.17. iMachining modülünde kullanılan kesme parametreleri

CAM yazılımındaki bir diğer strateji olan iMachining modülü için işleme seviyesi 8 olarak alınmıştır. İşlemede kullanılan bu değer gerçek kesim şartlarında tezgâhın performans ve veriminin en üst seviyede olması demektir. CNC tezgâhının özellikleri göz önüne alınarak kontrollü adımlama teknolojisi sayesinde en iyi kesme şartlarının otomatik olarak hesaplandığı kesme parametreleri Şekil 3.17’de gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi S (devir sayısı) maksimum 3.234 dev/dak, F (ilerleme hızı) 1.257 mm/dak ve yana kayma değerleri ise maksimum 0,636 ve minimum 0,114 mm değerleri arasındadır.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

## 4.1. XRD Bulguları

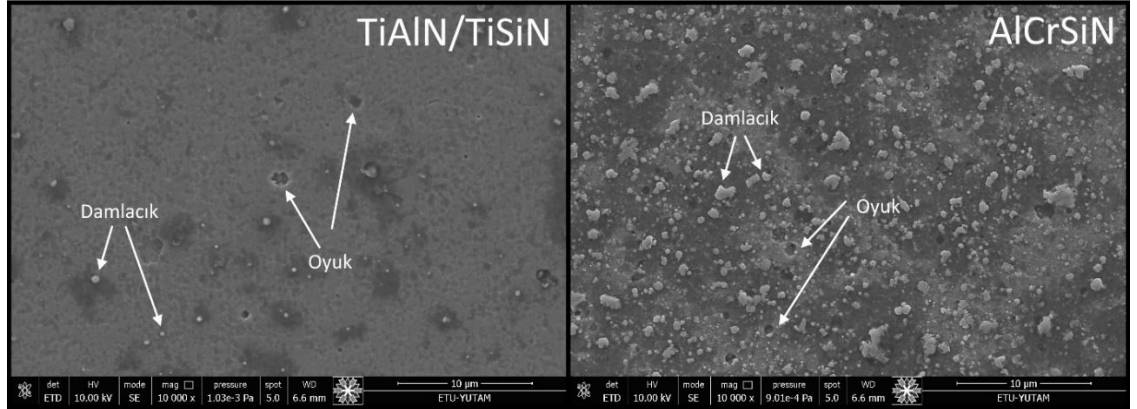
İşlemsiz tungsten karbür (WC-12Co), TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN ile kaplanmış numunelere ait XRD sonuçları Şekil 4.1'deki grafikte verilmiştir. İşlemsiz taban malzemede WC pikleri görülürken, kaplanmış numunelerde ise nitrür bileşiklerine ait pikler ve şiddeti düşmek suretiyle taban malzemeye ait WC pikleri elde edilmiştir. TiAlN/TiSiN ile kaplanan tungsten karbür numunede TiSiN ve TiAlN fazları oluşmuştur (Chang et al., 2007; Kara et al., 2018). AlCrSiN ile kaplanan tungsten karbür numunede ise CrN ve CrAlN fazları tespit edilmiştir (Drozd et al., 2020; Polcar & Cavaleiro, 2011b). XRD grafikleri incelendiğinde, kaplanmış numunelerde kaplama kalınlığının nispeten düşük olmasından dolayı, taban malzemeden gelen WC pikleri de görülmekte olup, tespit edilen nitrür bileşiklerine ait pikler literatürde yapılan çalışmalar ile uyumlu olarak elde edilmiştir. Yapılan genel değerlendirme sonrası, TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN nitrür esaslı kaplamaların, tungsten karbür malzeme üzerine başarılı bir şekilde büyütüldüğünü göstermektedir.



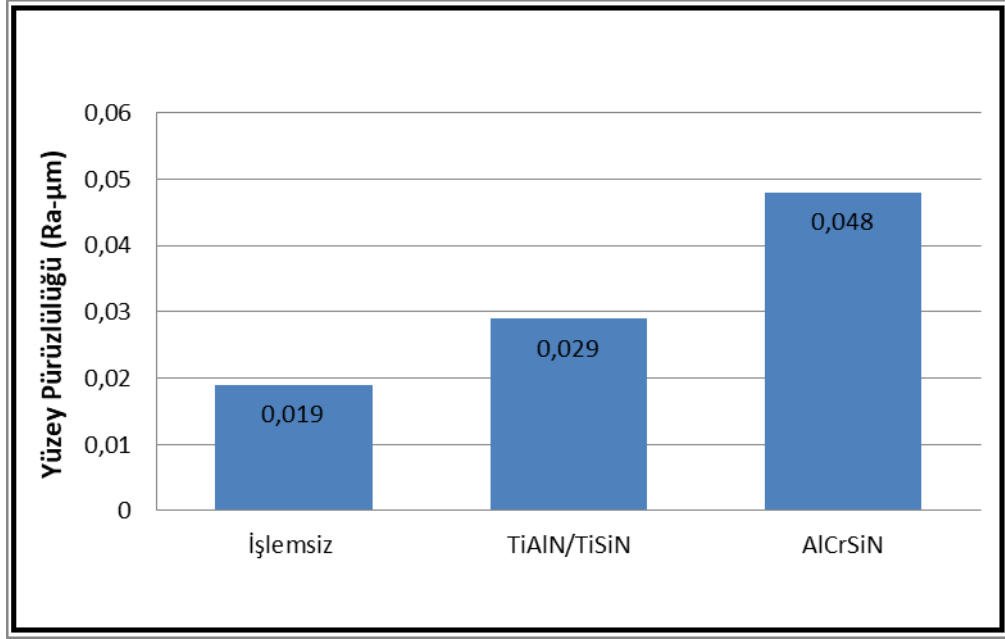
Şekil 4.1. İşlemsiz ve kaplanmış numunelerin XRD grafikleri

#### 4.2. Kaplama Yüzey Morfolojisi, Pürüzlülük ve Kalınlık Bulguları

Tungsten karbür taban malzeme üzerine büyütülen TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN ince filmlerinin yüzey morfolojisi SEM görüntüleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Yüzey SEM görüntülerinde her iki ince film yüzeyinde de katodik ark fiziksel buhar kaplama işlemlerinde görülen karakteristik kusurlar olan damlacık (droplet) ve oyuk (hole) oluşumu dikkat çekmektedir. AlCrSiN ince filmi ile kaplanmış numunede söz konusu yüzey kusurlarının çok daha yoğun bir şekilde oluştuğu tespit edilmiştir. Damlacık oluşumu, kaplama işlemi esnasında azot ile yeterince reaksiyona giremeyen hedef malzemesinin buharlaşmasına ve oyuk oluşumu ise ilk film büyümesi sırasında büyük boyutlu damlacıkların ayrılması ve sonrasında yeni kaplama tabakası ile üzerlerine büyümesine bağlanmaktadır (Kara et al., 2018; Polcar & Cavaleiro, 2011b). İşlemsiz ve kaplanmış numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 4.3’te sunulmuştur. Tungsten karbür taban malzemenin ortalama yüzey pürüzlülük değeri  $R_a=0,019 \mu\text{m}$  olarak tespit edilmiş olup, ince film kaplama işlemleri sonrası SEM görüntülerinde de açıkça görüldüğü gibi yüzey pürüzlülüğü değerleri artmıştır. Çift tabakalı TiAlN/TiSiN ince filmi ile kaplanmış numunede ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri  $0,029 \mu\text{m}$  ve AlCrSiN ince filmi ile kaplanmış numunede ise  $0,048 \mu\text{m}$  olarak tespit edilmiştir.

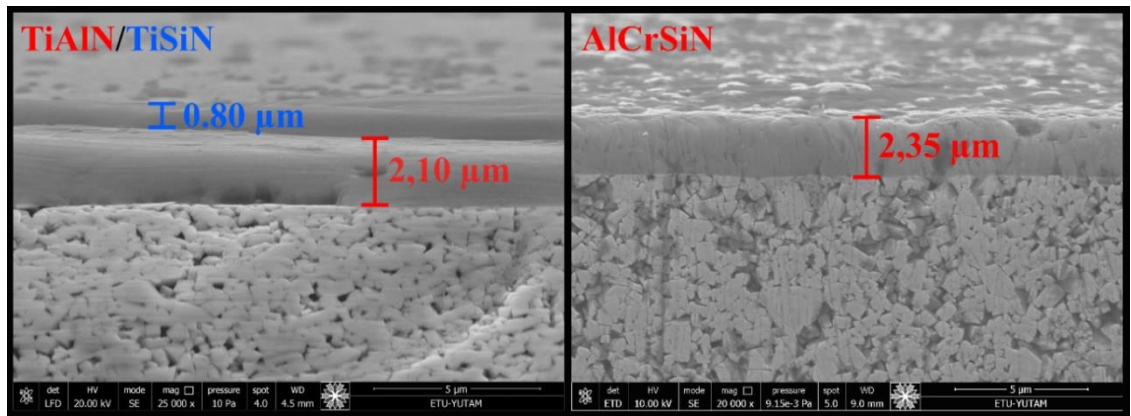


Şekil 4.2. TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN ince filmlerinin yüzey morfolojisi SEM görüntüleri



**Şekil 4.3.** İşlemsiz ve kaplanmış numunelerin yüzey pürüzlüğü değerleri

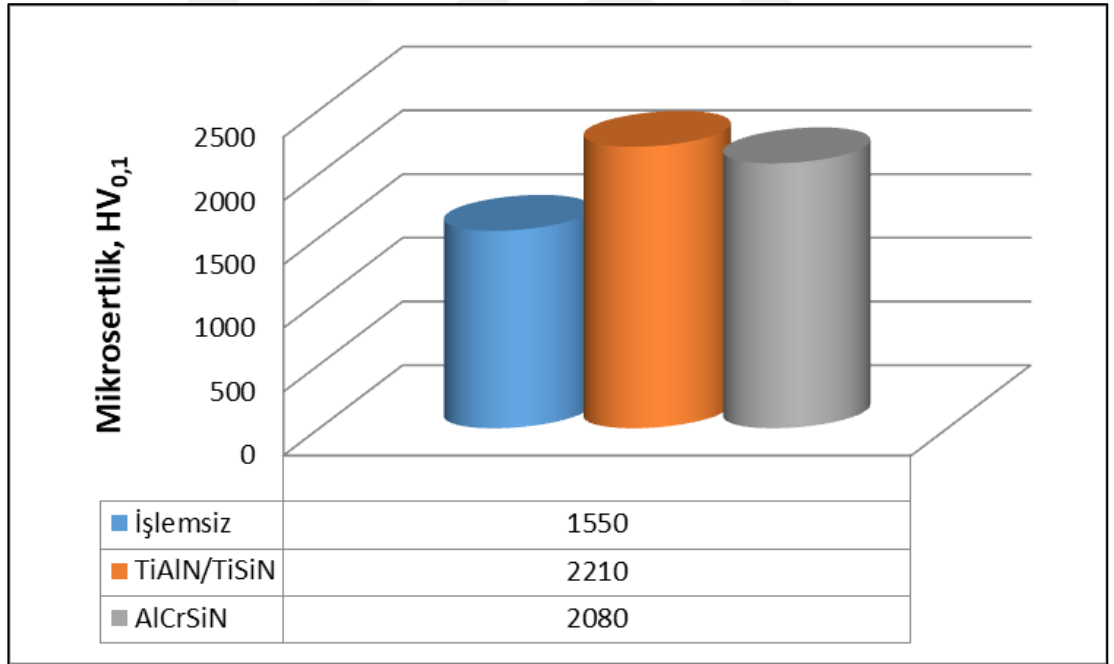
Tungsten karbür taban malzeme üzerine uygulanan TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN kaplamalarının kalınlık değerleri, kesit alınan numuneler üzerinde SEM vasıtası ile belirlenmiştir. Kesit SEM görüntüleri Şekil 4.4'te sunulmuştur. Çift katmanlı TiAlN/TiSiN kaplamasında TiAlN tabakasının kalınlığı 2,1 µm ve TiSiN tabakasının kalınlığı 0,8 µm olarak belirlenmiştir. AlCrSiN kaplama kalınlığı ise 2,35 µm olarak tespit edilmiştir. Her iki kaplamada da nitrür esaslı filmlerin taban malzeme üzerinde homojen bir şekilde büyütüldüğü görülmektedir. TiAlN/TiSiN kaplaması için hem TiAlN hem de TiSiN tabakalarının oldukça yoğun bir şekilde oluştuğu SEM resminde belirgin bir şekilde görülmektedir. AlCrSiN kaplamasında ise filmin kolonsal olarak büyüdüğü ve film içerisinde bazı bölgelerde bütünlüğün bozulduğu dikkat çekmektedir.



**Şekil 4.4.** TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN kaplamalarına ait kesit SEM görüntüleri

### 4.3. Mikro Sertlik Bulguları

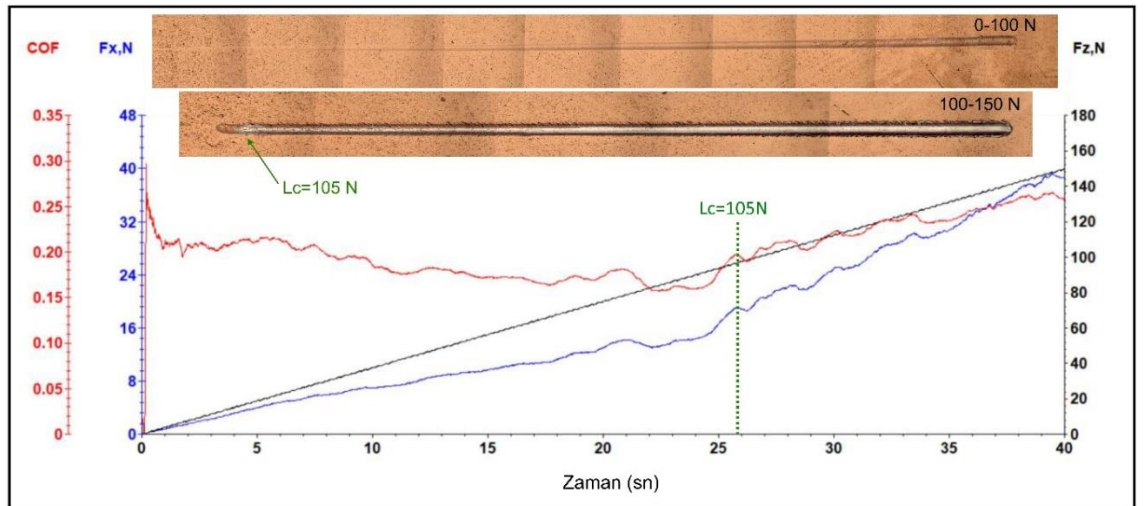
Tungsten karbür taban malzemesi üzerine büyütülen TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN kaplamalarının mikrosertlik değerleri Şekil 4.5'te verilmiştir. İşlemsiz malzemenin sertlik değeri yaklaşık 1.550 HV<sub>0,1</sub> olarak ölçülmüştür. Kaplanmış numuneler içerisinde en yüksek mikrosertlik değeri çift tabakalı TiAlN/TiSiN filmi ile kaplanmış numune için elde edilmiştir. TiAlN/TiSiN filmi ile kaplanmış numunenin mikrosertlik değeri 2.210 HV<sub>0,1</sub> iken, AlCrSiN filmi ile kaplanmış numunenin mikrosertlik değeri sertlik değeri 2.080 HV<sub>0,1</sub> olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada mikrosertlik testi kullanıldığı için, elde edilen sonuçlar tamamen ince filmlere ait olmayıp, taban malzeme sertliği etkisinin de ölçüme dahil olması söz konusudur. Çünkü literatürde yapılan çalışmalarda elde edilen nanosertlik sonuçlarına göre, karbür malzeme üzerine büyütülen TiAlN/TiSiN ince filmine ait sertlik değeri yaklaşık 35 GPa (3.550 HV) ve AlCrSiN ince filmi için ise 28 GPa (2.855 HV) olarak elde edilmiştir (Darmawan et al., 2010; Wang et al., 2021).



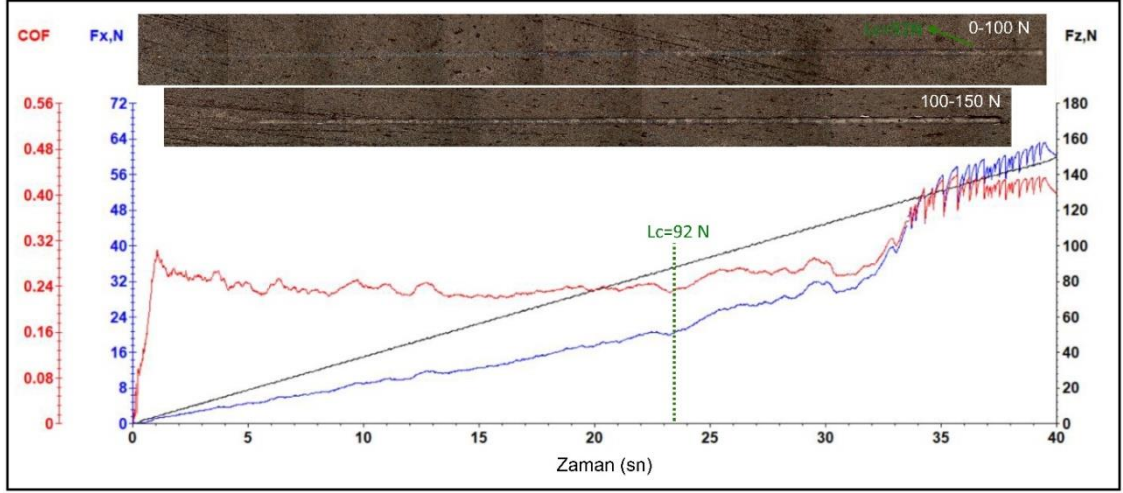
Şekil 4.5. Mikrosertlik değerleri

#### 4.4. Çizik (Scratch) Testi Analizleri

TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN ince filmleri ile kaplanmış tungsten karbür numunelerin çizik testi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı-sürtünme kuvveti diyagramı ve oluşturulan izlere ait birleştirilmiş optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 4.6 ve 4.7'de sunulmuştur. İnce filmlerin tungsten karbür malzemeden tamamen ayrıldığı yük değeri kritik yük ( $L_c$ ) olarak alınmıştır. TiAlN/TiSiN film ile kaplanmış numuneye ait sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde oldukça kararlı bir şekilde ilerlediği ve testin sonlarına doğru filmin taban malzemeden ayrılması ile yükseldiği görülmektedir. Hem sürtünme katsayısında meydana gelen değişim hem de optik mikroskop görüntülerinden yapılan değerlendirme sonucu, TiAlN/TiSiN film ile kaplanmış numuneye ait kritik yük değeri 105 N olarak belirlenmiştir. AlCrSiN film ile kaplanmış numuneye ait sürtünme katsayısı değerleri test boyunca dalgalanma göstermiş, batıcı ucun taban malzemeye tamamen indiği kritik yük değeri bu kaplama için yaklaşık 92 N olarak elde edilmiştir. Elde edilen kritik yük değerleri açısından yapılan değerlendirmede, kaplamaların tungsten karbür taban malzemeye adezyonlarının çok yüksek olduğu, özellikle TiAlN/TiSiN çift katmanlı filmin taban malzemeye çok iyi bir şekilde bağlandığı tespit edilmiş olup, literatürde elde edilen adezyon değerlerinden daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir (Kara et al., 2018; Z. R. Liu et al., 2019).

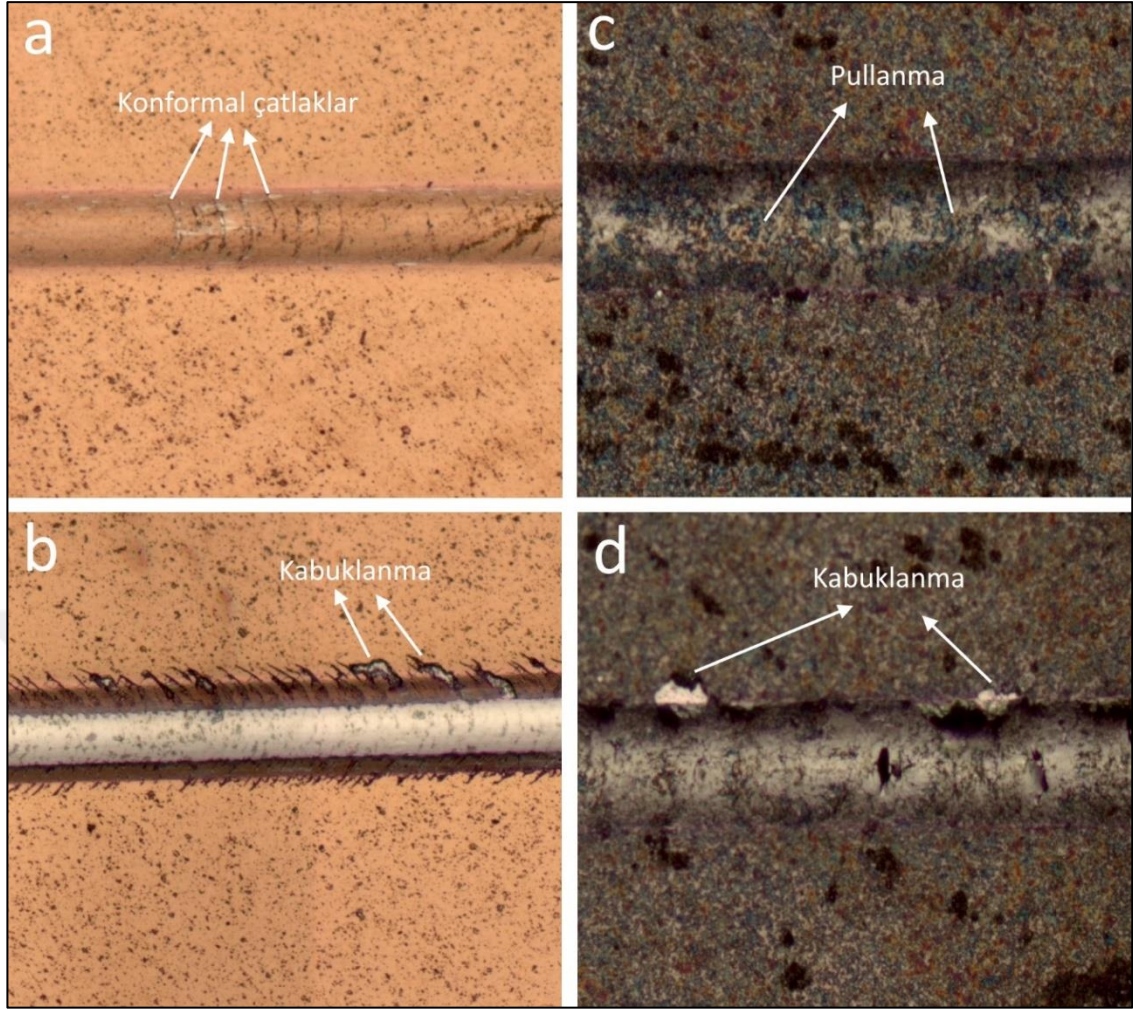


**Şekil 4.6.** TiAlN/TiSiN kaplanmış numuneye ait çizik testi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı-sürtünme kuvveti diyagramı ile uygulanan yük ilişkisi ve oluşturulan izlere ait birleştirilmiş optik mikroskop görüntüleri.



**Şekil 4.7.** AlCrSiN kaplanmış numuneye ait çizik testi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı-sürtünme kuvveti diyagramı ile uygulanan yük ilişkisi ve oluşturulan izlere ait birleştirilmiş optik mikroskop görüntüleri.

Çizik testi sonrası izlerden alınan optik mikroskop detay görüntüleri Şekil 4.8’de verilmiştir. TiAlN/TiSiN film ile kaplanmış numunede, film taban malzemeden tamamen ayrılmadan önce iz içerisinde yüksek sertliğe sahip taban malzeme ve kaplama malzemesi kombinasyonunda görülen konformal çekme çatlakları (conformal tensile cracks) oluşmuştur (ASTM C1624-05, 2010). Testin ilerleyen aşamalarında konformal çatlakların daha da büyümesi ile iz kenarlarında kabuklanma (spallation) hasarı görülmektedir. AlCrSiN film ile kaplanmış numunede ise nispeten daha düşük adezyonun bir sonucu olarak çizik izi içerisinde pullanma (flaking) hasarı oluşmuş ve testin ilerleyen aşamalarında iz kenarlarında kabuklanma hasarı şeklinde ince filmin parçalandığı tespit edilmiştir (ASTM C1624-05, 2010).



**Şekil 4.8.** Çizik testi sonrası izlerde oluşan hasarların optik mikroskop görüntüleri (a) TiAlN/TiSiN'e ait konformal çatlaklar, (b) TiAlN/TiSiN'e ait kabuklanma, (c) AlCrSiN'e ait pullanma, (d) AlCrSiN'e ait kabuklanma.

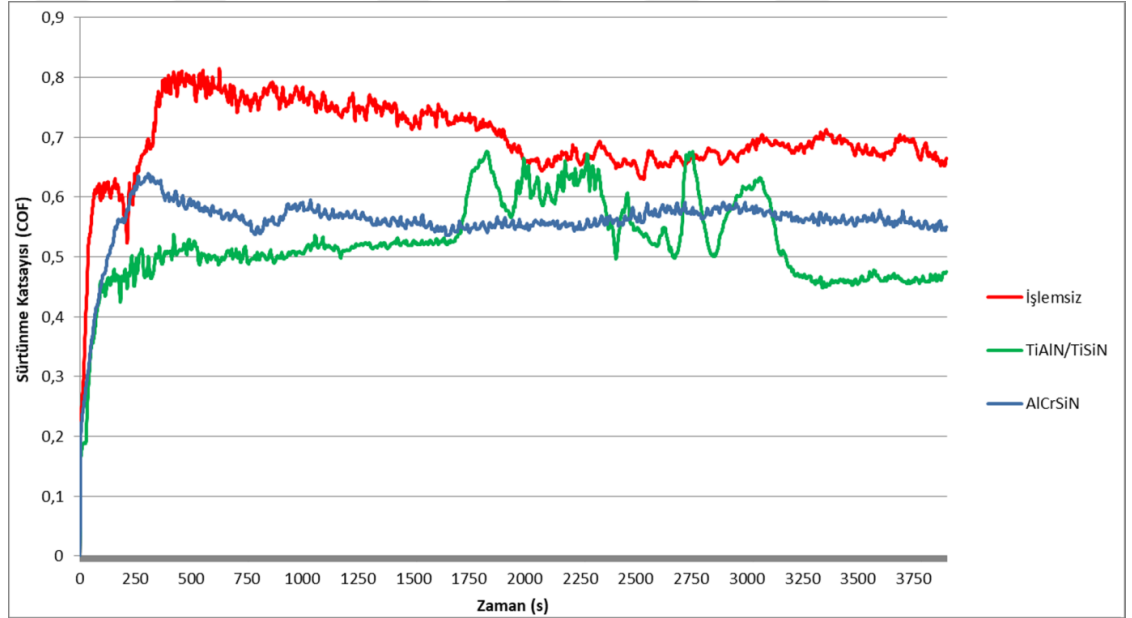
#### 4.5. Aşınma Testi Bulguları

##### 4.5.1. İşlemsiz ve kaplanmış numunelerin sürtünme katsayıları

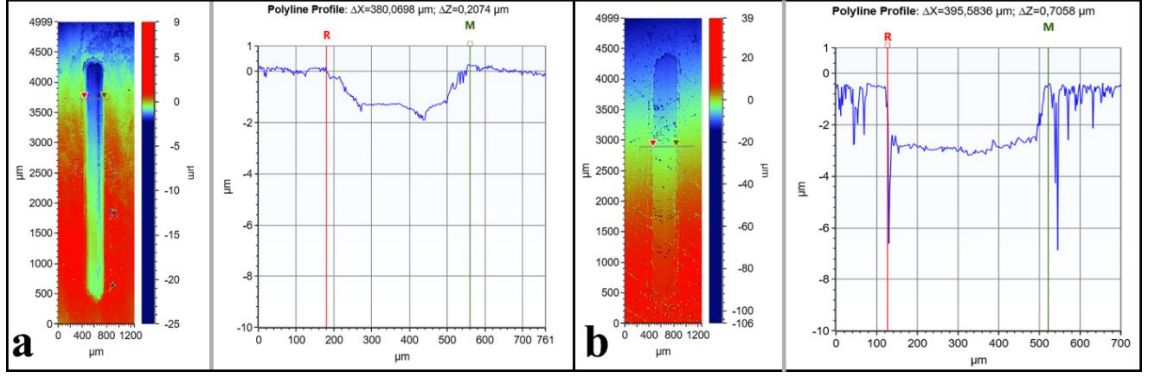
İşlemsiz tungsten karbür, TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN ile kaplanmış numunelerin aşınma testi esnasında elde edilen sürtünme katsayıları Şekil 4.9'da verilmiştir. Testin başlangıcında tüm numunelerde, aşındırıcı pin ile numunelerin ilk teması sonrası sürtünme katsayıları yükselmiş ve temas yüzeylerinin birbirini ile alışma süreci sonrası sürtünme katsayısı değerleri kararlı seyrine ulaşmıştır. İşlemsiz numune için ortalama sürtünme katsayısı 0,58, TiAlN/TiSiN film ile kaplanmış numune için 0,44, AlCrSiN film ile kaplanmış numune için ise 0,43 olarak belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı sonuçlarına göre en yüksek değerler işlemsiz numune için elde edilmiştir. TiAlN/TiSiN çift katmanlı

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

film ile kaplanmış numune, testin başlangıcında en düşük sürtünme katsayısı değerlerini sergilerken, 3.600 s'lik aşınma testinin yaklaşık ortalarında TiSiN katmanının hasara uğraması sonucu sürtünme katsayısı değerlerinde ani bir yükselme göstermiştir. Testin ilerleyen aşamalarında sürtünme katsayısı tekrar azalarak kararlı durumunu devam ettirmiştir. Bu durumu analiz etmek amacıyla aşınma testi sonrası numunelerden optik profilometre vasıtasıyla aşınma izi profili alınarak test sonucu aşındırıcı pinin indiği derinlik belirlenmiştir (Şekil 4.10). Aşınma testi sonrası TiAlN/TiSiN ince filmi ile kaplanmış numunede profil derinliği yaklaşık 2 µm olup TiAlN tabakasına ulaşılmıştır. AlCrSiN filmi ile kaplanmış numunede de taban malzemeye inilmemiş olup sürtünme katsayısı değerleri TiAlN/TiSiN kaplanmış numune ile yaklaşık aynı olmasına rağmen, test süresince kararlılığını devam ettirmiştir.



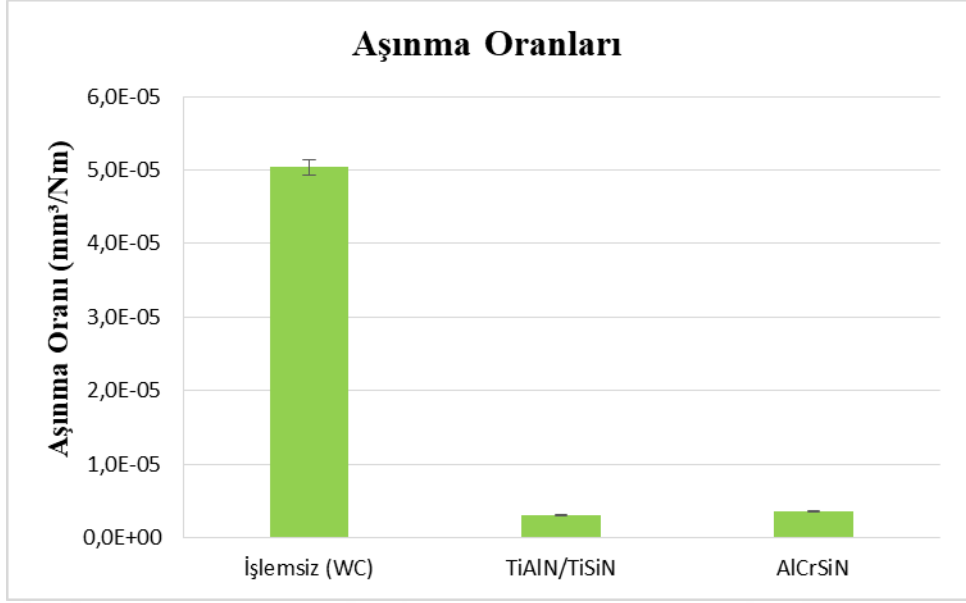
**Şekil 4.9.** İşlemsiz tungsten karbür, TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN ile kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları grafiği.



Şekil 4.10. Aşınma izi optik profilometre görüntüleri (a) TiAlN/TiSiN, (b) AlCrSiN

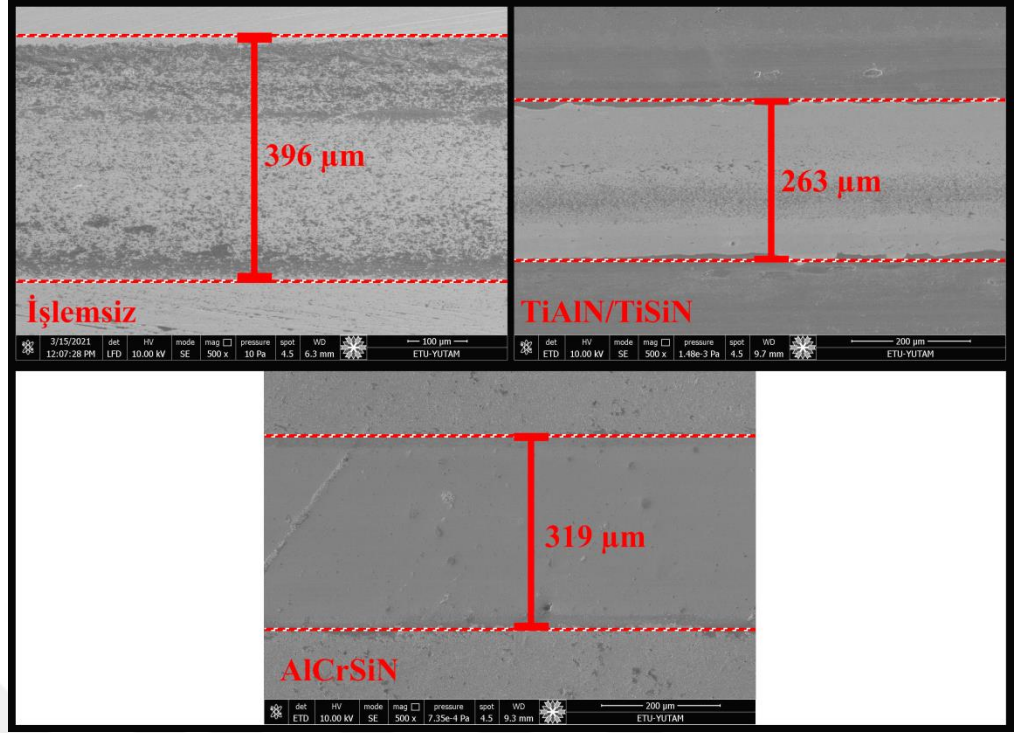
#### 4.5.2. İşlemsiz ve kaplanmış numunelerin aşınma oranları ile aşınma izi SEM görüntüleri

İşlemsiz tungsten karbür, TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN filmleri ile kaplanmış numunelere ait aşınma oranları (wear rate) Şekil 4.11’de verilmiştir. İnce film kaplama işlemleri sonrası aşınma oranı değerleri işlemsiz numuneye kıyasla önemli oranda azalmıştır. Şekil 4.11’de görüldüğü gibi en yüksek aşınma oranı işlemsiz numune için elde edilmiş olup, ince film ile kaplanmış numunelerin aşınma oranı değerleri birbirine yakın olmak kaydıyla TiAlN/TiSiN filmi ile kaplanmış numune için en düşük aşınma oranı değeri elde edilmiştir. Çift katmanlı TiAlN/TiSiN ince film ile kaplanmış numunenin, AlCrSiN ince filmi ile kaplanmış numuneye göre daha yüksek sertlik ve adezyon sergilemesinin bir sonucu olarak aşınma oranı değeri daha düşük olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak tungsten karbür taban malzeme üzerine büyütülen ince filmlerin aşınma davranışlarında önemli ölçüde pozitif etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 4.11.** İşlemsiz WC, TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN filmleri ile kaplanmış numunelere ait aşınma oranları grafiği.

İşlemsiz tungsten karbür, TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN filmleri ile kaplanmış numunelere ait aşınma izi SEM görüntüleri Şekil 4.12’de verilmiştir. En geniş aşınma izi işlemsiz numune için elde edilirken, ince film ile kaplanmış numunelerde aşınma izi genişlikleri önemli oranda azalmış ve her iki numune için de test sonrası taban malzemeye inilmemiştir. TiAlN/TiSiN ince filmi ile kaplanmış numunede aşınma izinin orta bölümünde oluşan farklı bir hat dikkat çekmektedir. Bu bölgenin oluşumu, sürtünme katsayısı grafiğinde ani yükselmeye sebep olan çift tabakalı kaplamadaki TiSiN filmin hasara uğraması durumunun bir sonucu olarak yorumlanmıştır.



Şekil 4.12. İşlemsiz WC, TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN filmleri ile kaplanmış numunelere ait aşınma izi SEM görüntüleri.

#### 4.6. İşlemsiz ve Kaplanmış Kesici Takımların Talaşlı İmalat Performansları

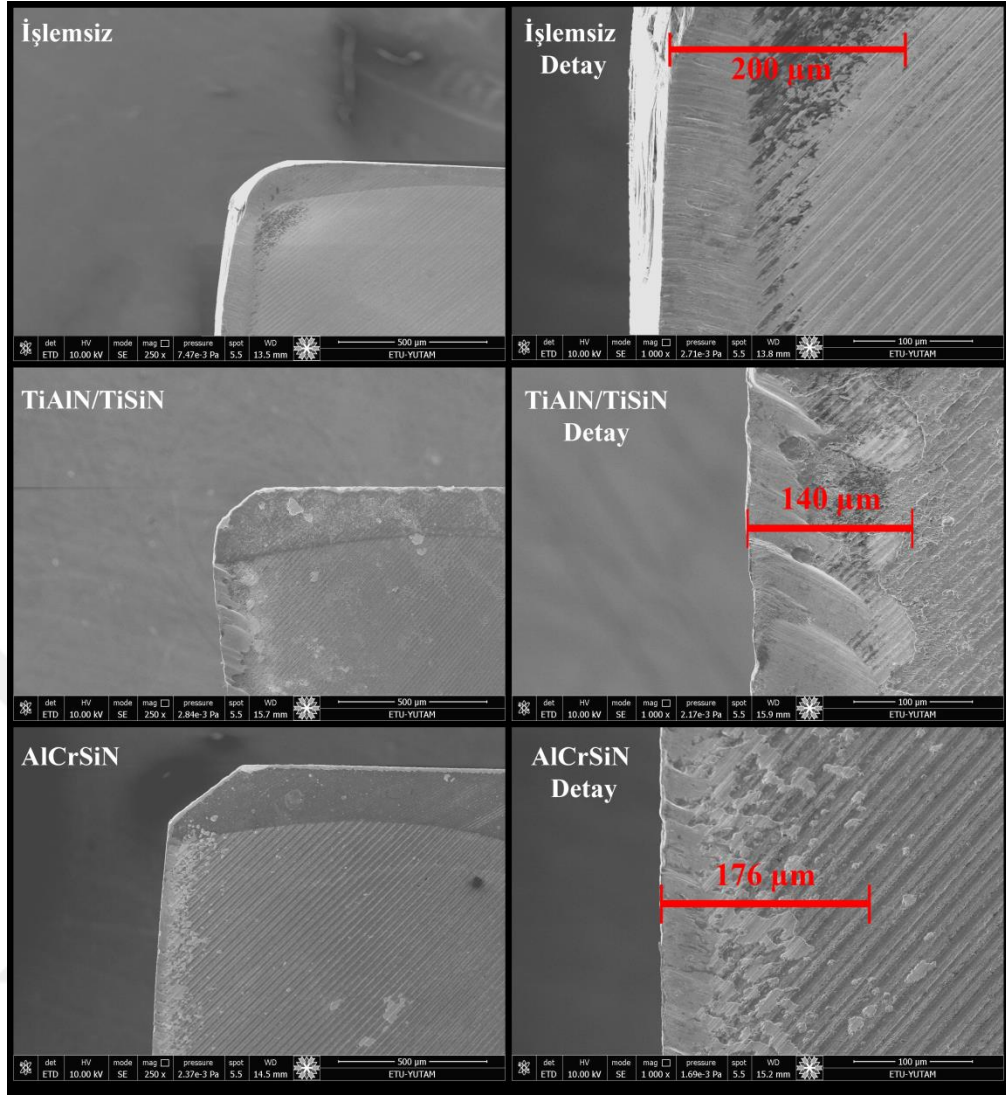
##### 4.6.1. İşlemsiz ve kaplanmış kesici takımlardaki aşınma bulguları

Bu çalışmada işlemsiz, TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN filmleri ile kaplanmış tungsten karbür kesici takımların frezeleme işlemi sonrası aşınma performanslarının belirlenmesi için yan kenar aşınma genişliği kriter olarak alınmıştır. Tüm takımlar, klasik kesim (2.5 eksen modülü) ve yeni nesil kesim (iMachining modülü) stratejileri ile test edilerek yan kenar aşınma genişlikleri SEM vasıtası ile belirlenmiştir. Yan kenar aşınma genişliklerine ait SEM görüntüleri klasik ve yeni nesil kesim stratejileri için sırasıyla Şekil 4.13 ve 4.14'te verilmiştir. Her iki kesim stratejisi için de en düşük yan kenar aşınma genişliği, aşınma test sonuçları ile de paralellik göstererek TiAlN/TiSiN ince filmi ile kaplanmış karbür takımlar için elde edilmiştir. Kuru şartlar altında ve yüksek hızda gerçekleştirilen frezeleme işleminde (iMachining modülü) kullanılan takımlar için belirlenen yan kenar aşınma genişliklerinin klasik kesime göre bir miktar yüksek olduğu ancak büyük bir farklılık oluşmadığı görülmektedir. Aynı talaş hacmi için, klasik kesim işleminde imalat süreci 30 dakika, yeni nesil kesim işleminde ise 12 dakika sürmüştür. Farklı kesim

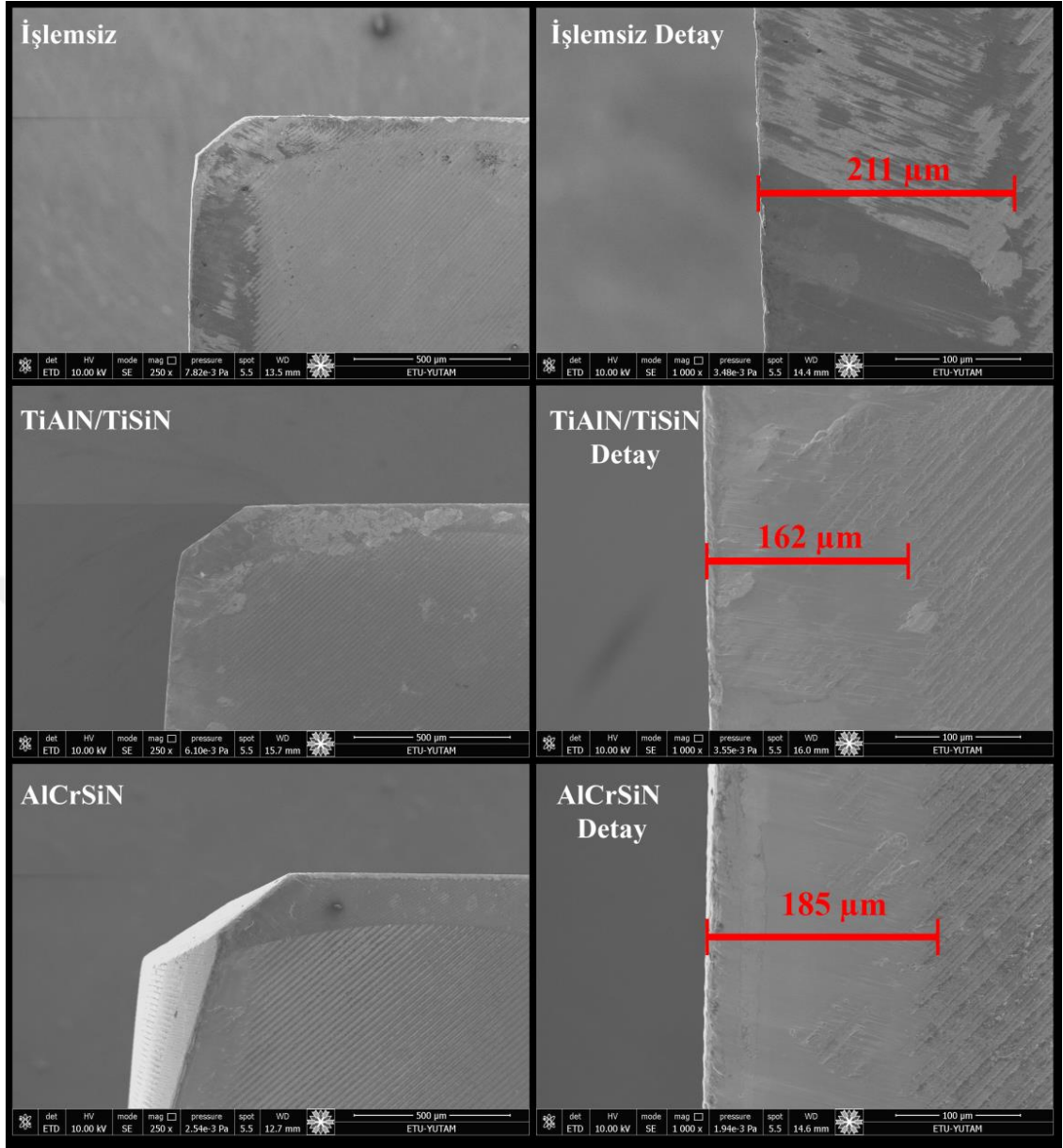
stratejileri arasındaki işleme sŸreleri aÇısından yapılan değerlendirmede, deęiŐken kesme parametrelerinin kullanıldığı iMachining stratejisinin takım aŐınmaları aÇısından oldukça avantajlı bir strateji olduğu gŸrŸlmektedir. Her iki kesim stratejisi iÇin de, ince film kaplama işleminin karbŸr takımların aşınma performansının iyileştirilmesi aÇısından etkili olduğu, Ÿzellikle Çift tabakalı TiAlN/TiSiN ince filminin daha ŸstŸn sonuÇlar verdiği tespit edilmiştir.

İŞlemsiz, TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN filmleri ile kaplanmış tungsten karbŸr kesici takımların aşınma performanslarının tespitinde, yan kenar aşınma genişliklerinin haricinde ayrıca, kesici takımlardaki kŸtle kayıpları belirlenmiştir. İŞlemsiz ve ince film ile kaplanmış kesici takımlar, klasik ve yŸksek hızlı frezeleme işlemleri Ÿncesi ve sonrası ultrasonik yıkama yapıldıktan sonra hassas terazide tartılmıştır. KŸtle kaybı sonuÇları Ŗekil 4.15'te verilmiŐ olup, elde edilen sonuÇlar yan kenar aşınma genişliği sonuŐlarını destekler niteliktedir. Genel olarak klasik kesim işlemleri sonucu elde edilen kŸtle kayıpları, iMachining stratejisi ile yapılan kesimler sonrası elde edilen değerlerden daha dŸŐŸk ŐıkmıŐtır. Kaplanmış takımlar aÇısından yapılan değerlendirmede, Çift tabakalı TiAlN/TiSiN ince filmi ile kaplanmış takımlardan elde edilen kŸtle kaybı değerleri her iki kesim stratejisi iÇin de AlCrSiN ince filmi ile kaplanmış takımlardan daha dŸŐŸk olarak elde edilmiştir.

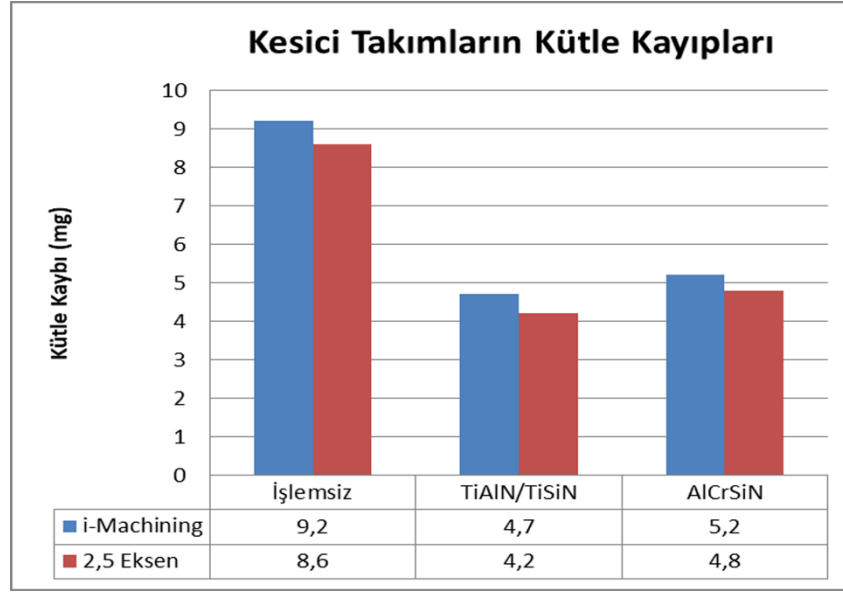
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.13. Klasik kesim stratejisi ile test edilen kesici takımların yan kenar aşınma genişlikleri.



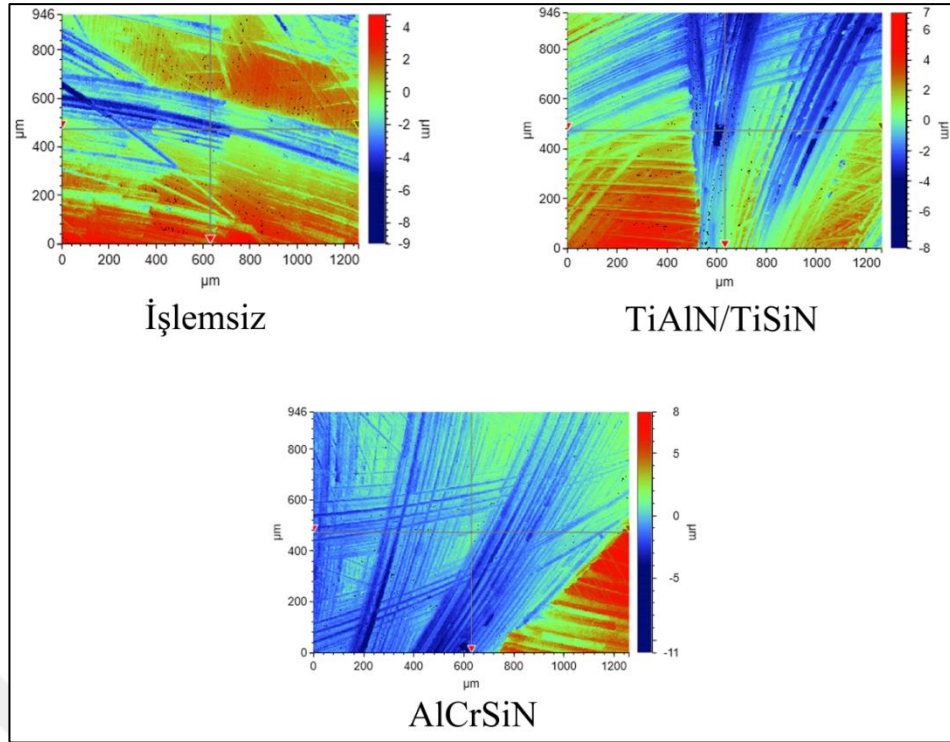
Şekil 4.14. Yeni nesil kesim stratejisi ile test edilen kesici takımların yan kenar aşınma genişlikleri.



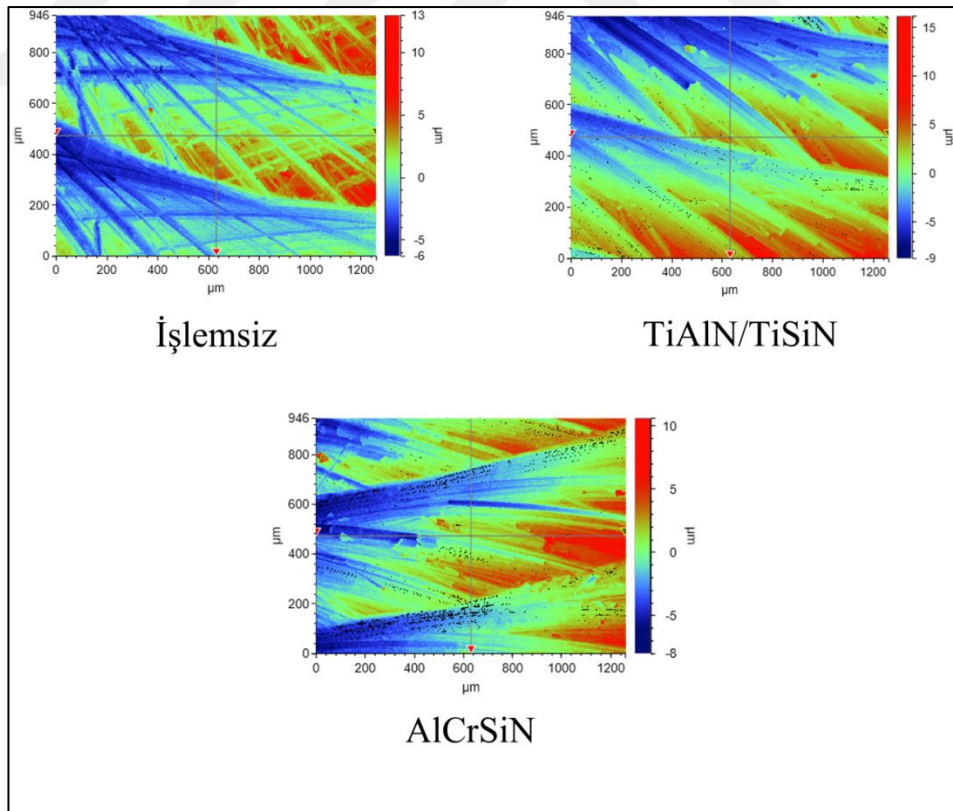
**Şekil 4.15.** Klasik ve yeni nesil kesim stratejisi ile test edilen kesici takımların kütle kayıpları grafiği.

#### 4.6.2. Talaşlı imalat sonrası iş parçalarının yüzey pürüzlülükleri

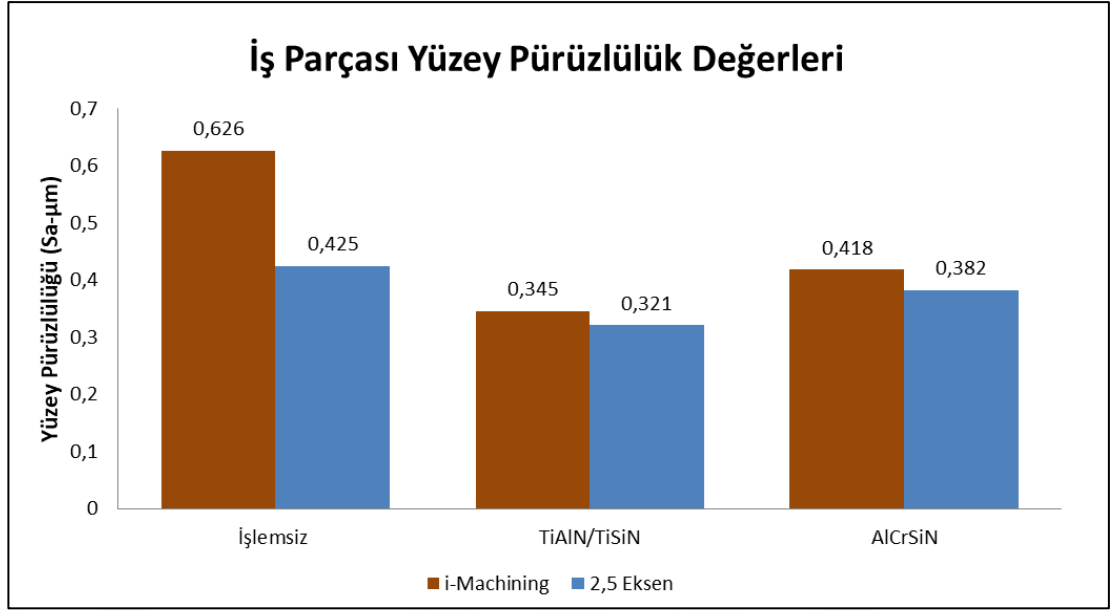
İşlemsiz, TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN filmleri ile kaplanmış tungsten karbür kesici takımlar ile farklı kesim stratejileri kullanılarak gerçekleştirilen talaşlı imalat işlemleri sonrası iş parçası olarak kullanılan plastik enjeksiyon kalıp çeliğinin yüzey kalitesini tespit etmek amacıyla yüzey pürüzlülüğü ( $S_a$ ) ölçümleri alınmıştır. Plastik enjeksiyon kalıp çeliği iş parçası son kesim yüzeyinden alınan yüzey profil haritası görüntüleri sırasıyla klasik kesim ve iMachining stratejisi için Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de verilmiştir. Kaplanmış takımlarda düşük sürtünme katsayısının bir sonucu olarak iş parçası yüzey pürüzlülüğü değerleri, işlemsiz takıma kıyasla daha düşük olarak elde edilmiştir. Klasik kesim stratejisi kullanılarak gerçekleştirilen frezeleme işlemlerinde daha düşük ilerleme kullanılmasının bir sonucu olarak iMachining stratejisine göre daha iyi yüzey kalitesi sunmuştur. Takımlar arasında yapılan karşılaştırma sonucu, çift tabakalı TiAlN/TiSiN ince filmi ile kaplanmış takımın, her iki kesim stratejisi için de AlCrSiN ince filmi ile kaplanmış takıma göre iş parçasında daha iyi yüzey kalitesi sağladığı tespit edilmiştir (Şekil 4.18).



Şekil 4.16. Klasik kesim stratejisi ile frezeleme işlemi sonrası iş parçası yüzey pürüzlülük görüntüleri.



Şekil 4.17. Yeni nesil kesim stratejisi ile frezeleme işlemi sonrası iş parçası yüzey pürüzlülük görüntüleri.



Şekil 4.18. İş parçası yüzey pürüzlülüğü değerleri

### 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

#### 5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, katodik ark fiziksel buhar kaplama yöntemiyle TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN ince filmleri ile kaplanan tungsten karbür kesici takım malzemesinin yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri kaplanmamış takım malzemesi ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada hem tungsten karbürden imal edilen standart deney numuneleri hem de gerçek çalışma ortamındaki performanslarının belirlenmesi amacıyla freze kesici takımları kullanılmıştır. Standart test prosedürlerinin haricinde kaplanmamış, TiAlN/TiSiN ve AlCrSiN ince filmleri ile kaplanmış kesici takımlar ile CNC freze tezgahında plastik enjeksiyon kalıp çeliği iş parçasının iki farklı kesim stratejisi ile talaşlı imalat işlemleri gerçekleştirilmiştir. Standart deney numuneleri ve kesici takımlarla gerçekleştirilen çalışmalar sonrası elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- XRD sonuçlarına göre, TiAlN/TiSiN ile kaplanan tungsten karbür numunede TiSiN ve TiAlN fazları oluşmuştur. AlCrSiN ile kaplanan tungsten karbür numunede ise CrN ve CrAlN fazları tespit edilmiştir. Kaplanmış numunelerde kaplama kalınlığının nispeten düşük olmasından dolayı, taban malzemeden gelen WC pikleri de görülmekte olup, tespit edilen nitrür bileşiklerine ait pikler literatürde yapılan çalışmalar ile uyumlu olarak elde edilmiştir.
- TiAlN/TiSiN kaplamasında TiAlN tabakasının kalınlığı 2,1 µm ve TiSiN tabakasının kalınlığı 0,8 µm olarak belirlenmiştir. AlCrSiN kaplama kalınlığı ise 2,35 µm olarak tespit edilmiştir. Her iki kaplamada da nitrür esaslı filmler taban malzeme üzerinde homojen bir şekilde büyütülmüştür. TiAlN/TiSiN kaplaması için hem TiAlN hem de TiSiN tabakalarının oldukça yoğun bir şekilde oluştuğu, AlCrSiN kaplamasında ise filmin kolonsal olarak büyüdüğü ve film içerisinde bazı bölgelerde bütünlüğün bozulduğu tespit edilmiştir.
- Kaplanmamış numunenin yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) 0,019 µm iken kaplama işlemleri sonrası yüzey pürüzlülüğü değerleri artmıştır. TiAlN/TiSiN ince filmi

ile kaplanmış numunede yüzey pürüzlüğü değeri 0,029  $\mu\text{m}$ , AlCrSiN ile kaplanmış numunede ise 0,048  $\mu\text{m}$  olarak elde edilmiştir.

- İşlemsiz malzemenin sertlik değeri yaklaşık 1.550 HV<sub>0,1</sub> olarak ölçülmüşken, TiAlN/TiSiN filmi ile kaplanmış numunenin mikrosertlik değeri 2.210 HV<sub>0,1</sub>, AlCrSiN filmi ile kaplanmış numunenin mikrosertlik değeri sertlik değeri ise 2.080 HV<sub>0,1</sub> olarak belirlenmiştir.
- Çizik testi sonuçlarına göre, TiAlN/TiSiN film ile kaplanmış numuneye ait kritik yük değeri 105 N olarak belirlenmiştir. AlCrSiN film ile kaplanmış numuneye ait sürtünme katsayısı değerleri test boyunca dalgalanma göstermiş, batıcı ucun taban malzemeye tamamen indiği kritik yük değeri bu kaplama için yaklaşık 92 N olarak elde edilmiştir. Özellikle TiAlN/TiSiN çift katmanlı filmin taban malzemeye çok iyi bir şekilde bağlandığı tespit edilmiş olup, literatürde elde edilen adezyon değerlerinden daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir.
- İşlemsiz numune için ortalama sürtünme katsayısı 0,58, TiAlN/TiSiN film ile kaplanmış numune için 0,44, AlCrSiN film ile kaplanmış numune için ise 0,43 olarak belirlenmiştir.
- En yüksek aşınma oranı işlemsiz numune için elde edilmiş olup, ince film ile kaplanmış numunelerin aşınma oranı değerleri birbirine yakın olmak kaydıyla TiAlN/TiSiN filmi ile kaplanmış numune için en düşük aşınma oranı değeri elde edilmiştir. Çift katmanlı TiAlN/TiSiN ince film ile kaplanmış numunenin, AlCrSiN ince filmi ile kaplanmış numuneye göre daha yüksek sertlik ve adezyon ile daha düşük sürtünme katsayısı sergilemesinin bir sonucu olarak aşınma oranı değeri daha düşük olarak elde edilmiştir.
- İşlemsiz ve kaplanmış takımlarla gerçekleştirilen talaşlı imalat işlemleri sonrası aşınma hasarı için kriter olarak alınan yan kenar aşınma genişliği değerlerine göre, her iki kesim stratejisi için de en düşük yan kenar aşınma genişliği, aşınma test sonuçları ile de paralellik göstererek TiAlN/TiSiN ince filmi ile kaplanmış karbür takımlar için elde edilmiştir.

- Klasik kesim işlemleri sonucu takımlardan elde edilen kütle kayıpları, iMachining stratejisi ile yapılan kesimler sonrası elde edilen değerlerden daha düşük çıkmıştır. Kaplanmış takımlar açısından yapılan değerlendirmede, çift tabakalı TiAlN/TiSiN ince filmi ile kaplanmış takımlardan elde edilen kütle kaybı değerleri her iki kesim stratejisi için de AlCrSiN ince filmi ile kaplanmış takımlardan daha düşük olarak elde edilmiştir.
- Kaplanmış takımlarda düşük sürtünme katsayısının bir sonucu olarak iş parçası yüzey pürüzlülüğü değerleri, işlemsiz takıma kıyasla daha düşük olarak elde edilmiştir. Klasik kesim stratejisi kullanılarak gerçekleştirilen frezeleme işlemlerinde daha düşük ilerleme kullanılmasının bir sonucu olarak iMachining stratejisine göre daha iyi yüzey kalitesi sunmuştur. Takımlar arasında yapılan karşılaştırma sonucu, çift tabakalı TiAlN/TiSiN ince filmi ile kaplanmış takımın, her iki kesim stratejisi için de AlCrSiN ince filmi ile kaplanmış takıma göre iş parçasında daha iyi yüzey kalitesi sağladığı tespit edilmiştir.

### 5.2. Öneriler

Yapılan bu çalışmada tungsten karbür kesici takım malzemesinin TiAlN/TiSiN çift tabakalı ince film ve AlCrSiN ince filmlerle kaplanması sonrası, takım malzemesinin mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştirildiği ve daha iyi iş parçası yüzey kalitesi sağlanmasında etkili olduğu tespit edilmiştir. Yapılan kaplamalardan TiAlN/TiSiN çift tabakalı ince film kaplamanın sahip olduğu üstün mekanik ve tribolojik özellikleri ile hem yeni nesil talaşlı imalat uygulamalarında hem de klasik kesim işlemlerinde tercih edilebilir bir kaplama olduğu sonucuna varılmıştır.

Daha sonra yapılacak çalışmalarda farklı bileşime sahip çift tabakalı kaplamaların karşılaştırmalı olarak mekanik ve tribolojik özellikleri ile talaşlı imalattaki performansları incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- Anonim, 2021a. Web Sitesi: <https://www.tekyaz.com/urunler/solidcam/2-5-eksen/>, Erişim Tarihi: 03.08.2021
- Anonim, 2021b. Web Sitesi: <https://www.tekyaz.com/urunler/solidcam/imachining-2D/>, Erişim Tarihi: 03.08.2021
- Anonymous, 2017. Web Sitesi: <https://blog.tormach.com/cnc-machine-cutting-tools-coatings-arent-conspiracy>, Erişim Tarihi: 02.08.2021
- ASTM C1624-05, 2010. Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing, ASTM, Conshohocken.
- Cai, F., Gao, Y., Zhang, S., Zhang, L. and Wang, Q. 2019. Gradient architecture of Si containing layer and improved cutting performance of AlCrSiN coated tools. *Wear*, 424, 193-202.
- Chang, C.L., Chen, W.C., Tsai, P.C., Ho, W.Y. and Wang, D.Y. 2007. Characteristics and performance of TiSiN/TiAlN multilayers coating synthesized by cathodic arc plasma evaporation. *Surface and Coatings Technology*, 202(4), 987-992.
- Chang, Y.Y. and Amrutwar, S. 2019. Effect of Plasma Nitriding Pretreatment on the Mechanical Properties of AlCrSiN-Coated Tool Steels. *Materials*, 12(5), 795.
- Chen, Y., Du, H., Chen, M., Yang, J., Xiong, J. and Zhao, H. 2016. Structure and wear behavior of AlCrSiN-based coatings. *Applied Surface Science*, 370, 176-183.
- Chinchanikar, S. and Choudhury, S. K. 2014. Hard turning using HiPIMS-coated carbide tools: Wear behavior under dry and minimum quantity lubrication (MQL). *Measurement*, 55, 536-548.
- Darmawan, W., Usuki, H., Rahayu, I. S., Gottlöber, C. and Marchal, R. 2010. Wear Characteristics of Multilayer-Coated Cutting Tools when Milling Particleboard. *Forest Products Journal*, 60(7-8), 615-621.
- Davis, J. R. 2001. *Surface Engineering For Corrosion and Wear Resistance*. ASM International, 257, USA.
- Drozd, K., Walczak, M., Szala, M. and Gancarczyk, K. 2020. Tribological Behavior of AlCrSiN-Coated Tool Steel K340 Versus Popular Tool Steel Grades. *Materials*, 13(21), 4895.
- Edwards, R. 1993. *Cutting Tools*. Institute of Materials, 214, London.

- Gautier, G., Faga, M. G. and Tebaldo, V. 2019. Impact Wear Resistance of Nanocomposite Coatings for Aircraft Components. *Key Engineering Materials*, 813, 387-392.
- Groover, M. P. 2019. *Fundamentals of Modern Manufacturing*. John Wiley & Sons, 1016, Hoboken.
- Groover, M. P., Yurdakul, M. and İç, Y. T. 2016. *Modern İmalatın Prensipleri*. Nobel Akademik Yayıncılık, 1002, Ankara.
- Helmersson, U., Todorova, S., Barnett, S. A., Sundgren, J. E., Markert, L. C. and Greene, J. E. 1987. Growth of single-crystal TiN/VN strained-layer superlattices with extremely high mechanical hardness. *Journal of Applied Physics*, 62(2), 481-484.
- Holmberg, K. and Matthews, A. 2009. *Coatings Tribology*. Elsevier B.V., 560, Oxford.
- Inagawa, K., Watanabe, K., Saitoh, K., Yuchi, Y. and Itoh, A. 1989. Structure and properties of c-BN film deposited by activated reactive evaporation with a gas activation nozzle. *Surface and Coatings Technology*, 39, 253-264.
- Kalpakjian, S. and Schmid, S. R. 2009. *Manufacturing Engineering and Technology*. Pearson Prentice Hall, 1205, New Jersey.
- Kara, L., Asl, H. G. and Karadayi, Ö. 2018. The effect of TiN, TiAlN, CrAlN, and TiAlN/TiSiN coatings on the wear properties of AISI H13 steel at room temperature. *Surface Review and Letters*, 26(09), 1950063.
- Kim, B. S., Chung, W. Y., Rhee, M.-H. and Lee, S.-Y. 2012. Studies on the application of laser surface texturing to improve the tribological performance of AlCrSiN-Coated surfaces. *Metals and Materials International*, 18(6), 1023-1027.
- Kulkarni, A. P. and Sargade, V. G. 2013. Performance of Multilayered PVD Coated Cemented Carbide Inserts during Dry Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel. *Advanced Materials Research*, 794, 248-254.
- Kumar, C. S. and Patel, S. K. 2018. Performance analysis and comparative assessment of nano-composite TiAlSiN/TiSiN/TiAlN coating in hard turning of AISI 52100 steel. *Surface and Coatings Technology*, 335, 265-279.
- Leondes, C. T. 2003. *Computer Aided and Integrated Manufacturing Systems*. World Scientific, 313, Singapore.
- Liu, Y., Liu, H. d., Wan, Q., Cai, Y., Chen, H., Chen, Y. m., Guo, J. I. and Yang, B. 2019. High-temperature oxidation behaviour of AlTiSiN and AlCrSiN coatings. *Surface Engineering*, 35(8), 652-660.

- Liu, Z. R., Peng, B., Xu, Y. X., Zhang, Q., Wang, Q. and Chen, L. 2019. Influence of Ni-addition on mechanical, tribological properties and oxidation resistance of AlCrSiN coatings. *Ceramics International*, 45(3), 3735-3742.
- Mehta, N. K. 2015. *Metal Cutting and Design of Cutting Tools, Jigs & Fixtures*. McGraw Hill Education, 436, India.
- Musil, J. 2012. Hard nanocomposite coatings: Thermal stability, oxidation resistance and toughness. *Surface and Coatings Technology*, 207, 50-65.
- Polcar, T. and Cavaleiro, A. 2011a. High-temperature tribological properties of CrAlN, CrAlSiN and AlCrSiN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 206(6), 1244-1251.
- Polcar, T. and Cavaleiro, A. 2011b. High temperature properties of CrAlN, CrAlSiN and AlCrSiN coatings – Structure and oxidation. *Materials Chemistry and Physics*, 129(1), 195-201.
- Radhakrishnan, P. 2015. *Computer Numerical Control Machines and Computer Aided Manufacture*. New Academic Science, 454, London.
- Smith, G. T. 2008. *Cutting Tool Technology*. Springer, 599, London.
- Sousa, V. F. C. and Silva, F. J. G. 2020. Recent Advances in Turning Processes Using Coated Tools—A Comprehensive Review. *Metals*, 10(2), 170.
- Sousa, V. F. C., Silva, F. J. G., Alexandre, R., Fecheira, J. S. and Silva, F. P. N. 2021. Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel. *Wear*, 476, 203695.
- Stephenson, D. A. and Agapiou, J. S. 2016. *Metal Cutting Theory and Practice*. Taylor & Francis Group, 931, Boca Raton.
- Takadom, J. 2008. *Materials and Surface Engineering in Tribology*. ISTE Ltd, 226, London.
- Tracton, A. A. 2006. *Coatings Technology Handbook*. Taylor & Francis Group, 828, Boca Raton.
- Wang, C. Y., Xie, Y. X., Qin, Z., Lin, H. S., Yuan, Y. H. and Wang, Q. M. 2015. Wear and breakage of TiAlN- and TiSiN-coated carbide tools during high-speed milling of hardened steel. *Wear*, 336, 29-42.
- Wang, R., Mei, H., Li, R., Zhang, T. and Wang, Q. 2021. Influence of V addition on the microstructure, mechanical, oxidation and tribological properties of AlCrSiN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 407, 126767.

- Weicheng, K., Hui, S. and Dejun, K. 2018. Microstructure and Tribological Properties of Cathodic Arc Ion Plated TiAlN and TiSiN Coatings at High Temperatures. *Journal of Tribology*, 140(4), 041301.
- Wu, W., Chen, W., Yang, S., Lin, Y., Zhang, S., Cho, T. Y., Lee, G. H. and Kwon, S. C. 2015. Design of AlCrSiN multilayers and nanocomposite coating for HSS cutting tools. *Applied Surface Science*, 351, 803-810.
- Wu, Z., Zhou, F., Ma, Q., Wang, Q., Zhou, Z. and Kwok-Yan Li, L. 2016. Tribological and electrochemical properties of Cr-Si-C-N coatings in artificial seawater. *RSC Advances*, 6(80), 76724-76735.
- Yıldız, F. 2005. Nitrülenmiş AISI 4140 Çeliğinin Plazma Ortamında Yaşlanma Davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 53, Erzurum.
- Zhang, J. and Jung, Y. G. 2018. *Advanced Ceramic and Metallic Coating and Thin Film Materials for Energy and Environmental Applications*. Springer, 286, Switzerland.
- Zhang, Q., Xu, Y., Zhang, T., Wu, Z. and Wang, Q. 2018. Tribological properties, oxidation resistance and turning performance of AlTiN/AlCrSiN multilayer coatings by arc ion plating. *Surface and Coatings Technology*, 356, 1-10.
- Zhang, S., Sun, D., Fu, Y. and Du, H. 2003. Recent advances of superhard nanocomposite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 167(2), 113-119.