

T.C.
BARTIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

NANOTABAKALI AITiN/TiN KAPLAMALI KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN
Ti6Al4V ALAŞIMININ FREZELENMESİNDE KESME PERFORMANSLARININ
VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN
Emre ALTAŞ

DANIŞMAN
Doç. Dr. Halil ÇALIŞKAN

BARTIN-2015

KABUL VE ONAY

Emre ALTAŞ tarafından hazırlanan “NANOTABAKALI AİTİN/TİN KAPLAMALI KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN Ti6Al4V ALAŞIMININ FREZELENMESİNDE KESME PERFORMANSLARININ VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, 29.12.2015 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Halil ÇALIŞKAN (Danışman)



Üye : Doç. Dr. M. Sabri GÖK



Üye : Yrd. Doç. Dr. Ferit FIÇICI



Bu tezin kabulü Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../.../20... tarih ve 20.../..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. H. Selma ÇELİKİYAY
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Halil ÇALIŞKAN danışmanlığında hazırlamış olduğum “NANOTABAKALI AlTiN/TiN KAPLAMALI KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN Ti6Al4V ALAŞIMININ FREZELENMESİNDE KESME PERFORMANSLARININ VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

29.12.2015

Emre ALTAŞ

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesiyle aşmamda yardımcı olan, çalışma alanı hakkındaki bilgi ve becerisini esirgemeyen değerli Danışman Hocam Doç. Dr. Halil ÇALIŞKAN'a teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarım sürecinde maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Bilal KURŞUNCU, yüksek lisans öğrencilerinden Turgay ÇAKIR ve Celil Çağatay CELİL'e teşekkür ederim. Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunuyorum. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi için 113M173 No'lu proje ile tezime maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Emre ALTAŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NANOTABAKALI AlTiN/TiN KAPLAMALI KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN Ti6Al4V ALAŞIMININ FREZELENMESİNDE KESME PERFORMANSLARININ VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Emre ALTAŞ

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Halil ÇALIŞKAN

Bartın-2015, sayfa: XXII + 115

Ti6Al4V titanyum alaşımı, sahip olduğu yüksek sıcaklık dayanımı ve biyolojik uyumluluğu nedeniyle havacılık ve sağlık alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, bu malzemenin işlenmesi sırasında ortaya çıkan yüksek kesme sıcaklıkları ve malzemenin kesici takım yüzeyine adezyonu nedeniyle, karbür kesici takımlar kısa sürede aşınmakta ve ömürlerini tamamlamaktadırlar. Karbür kesici takımların aşınma direncinin ve ömürlerinin artırılması amacıyla, bu tez çalışmasında, bu takımlar üzerine nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalar biriktirilmiştir. Ayrıca kuru işleme yapılarak soğutma sıvısı kullanımının ortadan kaldırılması ve böylece işleme maliyetlerinin azaltılması çalışmanın hedefleri arasındadır. Nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamaların aşınma davranışlarını ve kesme performanslarını karşılaştırmak amacıyla, tek tabakalı TiN ve tek tabakalı TiAlN kaplamalar da karbür takımlar üzerine biriktirilmiştir.

Üretilcek nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamaların mikrosertlik, altlık malzemeye adezyon ve sürtünme özelliklerinin belirlenmesi ve kesme performanslarının ortaya konması, bu kaplamaların, talaşlı imalat sektöründe kullanım şartlarının belirlenmesi açısından önem arz etmektedir. Bu yüzden bu tez çalışmasında, nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalar fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile altlık malzemeler ve karbür kesici takımlar üzerine

biriktirildikten sonra nanoindentasyon ile mikrosertlikleri, çizik testi ile altlık malzemeye adezyonları ve bilye-disk yöntemi ile sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Ti6Al4V alaşımı üzerinde yüzey frezeleme testleri yapılarak, bu kaplamanın karbür kesici takımların kesme performansı ve aşınma davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca, kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve iş parçasının yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Aşınmış kesici takımlar üzerinde SEM ve EDS analizleri yapılarak meydana gelen aşınma tipleri ve mekanizmaları ortaya koyulmuştur. Kaplamalı ve kaplamasız takımlar ile karşılaştırıldığında, nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı karbür kesici takımlar 1,2-4,0 kat daha uzun takım ömrü vermiştir. Nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamaların kesme kuvvetine ve yüzey pürüzlülüğüne olumlu bir etkisi gözlenmemiştir.

Anahtar Kelimeler

Nanotabakalı sert kaplamalar; frezeleme; kesme performansı; takım aşınması; yüzey pürüzlülüğü.

Bilim Kodu

625.02.04

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF CUTTING PERFORMANCE AND WEAR BEHAVIOR OF NANOLAYER AlTiN/TiN COATED CARBIDE CUTTING TOOLS DURING MILLING OF Ti6Al4V ALLOY

Emre ALTAŞ

Bartın University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Halil ÇALIŞKAN

Bartın-2015, pp: XXII + 115

Ti6Al4V titanium alloys are widely used in the aerospace and medical industries due to their high temperature resistance and biological adaptation. However, carbide cutting tools wear rapidly and complete their lifetime because of high cutting temperatures and build-up edge formation on the tool surface during machining of this material. In this study, nanolayer AlTiN/TiN coatings were deposited on the carbide tools to enhance the wear resistance and service life of these tools. In addition, to eliminate the need to use coolant consumption through enabling dry machining and thus to decrease the machining costs are among the goals of this study. In order to compare the wear behavior and cutting performance of the nanolayer AlTiN/TiN coatings, single layer TiN and single layer TiAlN coatings are also deposited on the carbide tools.

It is important to determine properties of the nanolayer AlTiN/TiN coatings (such that microhardness, adhesion to the substrates and friction) and also to introduce their cutting performances in order to indicate machining conditions of these coated tools in machining industry. Therefore, in this thesis, after the nanolayer AlTiN/TiN coating was deposited on the substrate materials and carbide cutting tools using physical vapor deposition method, their microhardness with nanoindentation, their adhesion to the substrate material with

scratch test and their friction coefficients with ball on disc method were determined. Performing face milling tests on Ti6Al4V alloy, the effect of the nanolayer AlTiN/TiN coating on cutting performance and wear behavior of the carbide cutting tools was examined. Also, cutting parameters' influence on cutting forces and workpiece surface roughness were determined. Wear mechanisms and wear types were revealed by performing SEM and EDS analysis on the worn cutting tools. When compared to the coated and uncoated carbide tools, the nanolayer AlTiN/TiN coated tools gave 1,2-4,0 times longer lifetime. A remarkable positive effect of the nanolayer AlTiN/TiN coating on cutting forces and workpiece surface roughness was not observed.

Key Words

Nanolayer hard coating; milling; cutting performance; tool wear; surface roughness.

Science Code

625.02.04

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL VE ONAY	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
TABLolar DİZİNİ.....	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxi
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 KURAMSAL TEMELLER	4
2.1 Titanyum Alaşımları	4
2.1.1 Titanyumun Üretimi.....	4
2.1.2 Titanyumun Kullanım Alanları	6
2.1.3 Titanyum Alaşımının Sınıflandırılması	7
2.1.3.1 Alaşımlandırılmamış (saf) Titanyum	8
2.1.3.2 Alfa (α) Titanyum Alaşımları.....	9
2.1.3.3 Alfa-Beta ($\alpha+\beta$) Titanyum Alaşımları.....	9
2.1.3.4 Beta (β) Titanyum Alaşımları	10
2.2 Titanyum Alaşımının Isıl İşlemleri.....	10
2.3 Sert Kaplamalar	11
2.3.1 Sert Kaplama Malzemeleri ve Tasarımı.....	12
2.3.2 Sert Kaplamaların Biriktirilmesi	14

Sayfa

2.3.2.1 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)	15
2.3.2.2 Magnetron Sıçratma	16
2.3.3 Tabakalı Kaplamaların Biriktirilmesi	17
2.3.4 Çok Tabakalı Sert Kaplamalar	19
2.3.5 Nanotabakalı Sert Kaplamalar	21
2.4 Frezeleme	24
2.4.1 Çevresel Frezeleme	25
2.4.1.1 Ters Yönlü Çevresel Frezeleme	25
2.4.1.2 Aynı (Eş) Yönlü Çevresel Frezeleme.....	26
2.4.2 Alın Frezeleme	26
2.4.3 Frezelemede Temel Parametreler.....	26
2.5 İşlenebilirlik ve İşlenebilirliği Etkileyen Faktörler.....	27
2.5.1 İşlenebilirlik	27
2.5.2 İşlenebilirliği Etkileyen Faktörler	27
2.5.3 Ti6Al4V Alaşımının İşlenebilirliği	28
2.5.3.1 Kesici Takım	29
2.5.3.2 Kesme Hızı	30
2.5.3.3 İlerleme.....	30
2.5.3.4 Kesme Derinliği	31
2.5.3.5 Kesme Sıvısının Kullanımı	31
2.6 Yüzey Pürüzlülüğü	32
2.6.1 Yüzey Pürüzlülüğünün Önemli Olduğu Durumlar	33
2.6.2 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçme Yöntemleri	33
2.6.3 Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörler	33
2.7 Takım Aşınması.....	34
2.7.1 Aşınma Mekanizmaları	35
2.7.1.1 Abrasiv Aşınma.....	35

Sayfa

2.7.1.2 Difüzyon Aşınması.....	35
2.7.1.3 Oksidasyon Aşınması	35
2.7.1.4 Yorulma ile Aşınma	36
2.7.1.5 Adeziv Aşınma.....	36
2.7.2 Takım Aşınma Tipleri.....	36
2.7.2.1 Serbest Yüzey Aşınması.....	36
2.7.2.2 Krater Aşınması.....	37
2.7.2.3 Çentikli Aşınması	37
2.7.2.4 Isıl ve Mekanik Çatlaklar	38
2.7.2.5 Yığıntı Kenar Oluşumu (BUE).....	38
2.7.2.6 Plastik Deformasyon	39
2.7.2.7 Kırılma.....	40
2.7.2.8 Kenar Çentiklenmesi	40
2.7.3 Takım Aşınmasının Kontrolü.....	41
2.7.4 Takım Ömrü	42
 BÖLÜM 3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	 43
 3.1 Kaplamalar ve Karakterizasyonu Üzerine Yapılan Çalışmalar	 43
3.2 Takım Ömrü, Takım Aşınması, Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Yapılan Çalışmalar	48
 BÖLÜM 4 MATERYAL VE YÖNTEM	 53
 4.1 Materyal	 53
4.1.1 Kaplama Malzemesi.....	53

4.1.2 Kesici Takım	54
4.1.3 Takım Tutucu	54
4.1.4 İş Parçası Malzemesi.....	55
4.1.5 Kullanılan Cihaz ve Sistemler.....	56
4.1.5.1 Kaplama Ünitesi	56
4.1.5.2 Bilye ile Krater Açma Cihazı	57
4.1.5.3 Nanoindenter	58
4.1.5.4 Çizik Testi Cihazı.....	59
4.1.5.5 Aşınma Testi Cihazı	59
4.1.5.6 Profilometre.....	60
4.1.5.7 Eş-Odaklı Mikroskop	61
4.1.5.8 Mikrosertlik Ölçüm Cihazı.....	61
4.1.5.9 Dinamometre	62
4.1.5.10 Yüzey Pürüzlülük Cihazı.....	63
4.1.5.11 Stereo Zoom Mikroskop.....	63
4.1.5.12 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	64
4.1.5.13 Enerji Dağılımlı Spektrometre (EDS)	65
4.1.5.14 X-ışını Kırınım Ölçer (XRD)	65
4.1.6 Tezgahlar.....	66
4.1.6.1 Kalıpcı Freze Tezgahı	66
4.1.6.2 Dik İşleme Merkezi	66
4.2 Yöntem.....	67
4.2.1 Kaplamaların Biriktirilmesi	67
4.2.1.1 Altlıkların Hazırlanması	67
4.2.1.2 Kaplama İşlemi.....	68
4.2.1.3 Kaplamaların Karakterizasyonu	69

4.2.2 Kesme Performansı Testleri	70
4.2.2.1 Kesme Parametrelerinin ve Deney Planının Belirlenmesi	71
4.2.2.2 Kesme Kuvveti Ölçümleri	74
4.2.2.3 İş Parçası Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Ölçülmesi	75
4.2.3 Aşınma Testleri	76
4.2.3.1 Takım Aşınmasının Ölçülmesi	77
 BÖLÜM 5 ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	79
 5.1 Kaplamaların Karakterizasyonu	79
5.1.1 Mekanik Özellikler	80
5.1.1.1 Sertlik Ölçümü Bulguları	80
5.1.1.2 Adezyon Ölçümü Bulguları	81
5.1.1.3 Sürtünme Katsayısı Ölçüm Bulguları	84
5.1.1.4 Yüzey Pürüzlülüğü	85
5.1.2 Yapısal Özellikler	86
5.1.2.1 Mikroyapı	86
5.1.2.2 XRD Bulguları	86
5.2 Kesme Performansı Testleri	88
5.2.1 Takım Aşınması Testleri	88
5.2.1.1 Takım Ömrü	88
5.2.1.2 Yüzey Pürüzlülüğü	91
5.2.1.3 Aşınma Mekanizmaları	93
5.2.2 Kesme Kuvveti Testleri	97
5.2.3 Kesici Takımların Bileşke Kesme Kuvvetleri Açısından Karşılaştırılması	97
5.2.4 Kesici Takımların İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğü Açısından Karşılaştırılması	102

BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	105
6.1 Sonuçlar	105
6.2 Öneriler	106
KAYNAKLAR.....	107
ÖZGEÇMİŞ.....	114

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
No	No
1. Titanyum alaşımlarının uygulamaları a) Diş implantları. b) Bir jet motoru	6
2. Sert kaplamaların tasarımı.	14
3. Yüzey mühendisliği tekniklerinin genel sınıflandırılması.	14
4. Magnetron kaynağının şematik görüntüsü	16
5. Kapalı alan dengesiz magnetron sıçratma sisteminin şematik gösterimi.....	17
6. Tabakalı kaplamaların biriktirilmesi için kullanılan iki farklı metodun şematik gösterimi: (a) İki hedef arası sıralı geçiş (b) İki hedef boyunca altlıkların döndürülme işlemi.....	19
7. Çok tabakalı yapıda mukavemet mekanizmalarının şematik gösterimi	21
8. İki tabakalı periyodun fonksiyonu olarak nanotabakalı TiN/VN kaplamanın sertliğinin değişimi.....	22
9. Nanotabakalı TiN/AlTiN kaplamanın TEM görüntüsü	23
10. Silindirik ve alın frezeleme: (a) Çevresel frezeleme (b) Alın frezeleme	24
11. Ters yönlü çevresel frezeleme (a) ve eş yönlü çevresel frezelemenin (b) şematik gösterimi.....	25
12. Ti6Al4V alaşımı için kesme hızı-takım ömrü-ilerleme grafiği.....	30
13. Sıvı azotun sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi.	32
14. Yüzey kalitesini tayin eden faktörler	33
15. Kesme hızı ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	34
16. Serbest yüzey aşınması	37
17. Krater Aşınması	37
18. Çentik Aşınması.....	38
19. Isıl çatlaklar.....	38
20. Yığılma Kenar Oluşumu (BUE)	39
21. Plastik deformasyon.	39
22. Kırılma	40
23. Kenar çentiklenmesi.....	40
24. Aşınma gelişimi ve ömür	41
25. Ömür-kesme hızı bağıntısı	41
26. Kullanılan sert kaplama yapılarının şematik gösterimi (a) Nanotabakalı AlTiN/TiN, (b) Tek tabakalı TiAlN, (c) Tek tabakalı TiN	53

Şekil	Sayfa
No	No
27. Karbür kesici takımların boyutu	54
28. Takım tutucu ve boyutları	54
29. Kesme testlerinde hazırlanan Ti6Al4V alaşımının şematik görüntüsü.....	56
30. Magnetron sıçratma ile biriktirme sisteminin şematik görüntüsü.....	57
31. Bilye ile krater açma cihazı.....	57
32. Fischerscope H100C nanoindenter	58
33. CSM Revetest çizik testi cihazı	59
34. CSM bilye-disk aşınma test cihazı.....	60
35. Taylor-Hobson profilometre	60
36. ZEISS Axio CSM 700 eşodaklı mikroskop	61
37. Rockwell-C mikrosertlik ölçüm cihazı	62
38. Kesme kuvvetlerinin ölçülmesinde kullanılan dinamometrenin teknik özellikleri ve boyutları	62
39. Mitutoyo SurfTest SJ-310 uçlu tip yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.....	63
40. Stereo Zoom Mikroskop.	64
41. TESCAN- MAIA3 model taramalı elektron mikroskobu.....	64
42. Kesici takımların taramalı elektron mikroskobu içindeki yerleşme görüntüsü.	65
43. Kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi.	65
44. Ti6Al4V alaşımı üzerinde kesme kuvveti ölçümleri için delik delinmesi işlemi.	66
45. Kesme testlerinde kullanılan deney sistemi.	67
46. AISI D2 soğuk iş takım çeliği altlıklar ve zımparalama işlemi.	68
47. a) Kesici takımların döner tabla üzerindeki pozisyonu b)Kaplama odasının açık görüntüsü.....	69
48. Kesme performansı sırasında deney aşamasında yapılacak olan adımların genel görüntüsü.....	70
49. Kesme performans testlerinde yüzey frezeleme işleminin şematik görüntüsü	71
50. Dyno Ware programı ile kesme kuvvetlerinin ölçülmesi sırasında bir görüntü	74
51. Kesme kuvveti sinyal görüntüsü.	75
52. Yüzey pürüzlülük cihazının kullanımı.	76
53. Takım aşınmasının ölçümü.	77
54. Bölgesel serbest yüzey aşınmaları ve çentikli aşınmanın ölçümü.	78

Şekil	Sayfa
No	No
55. Kaplamalar üzerinde oluşturulan krater izleri.....	79
56. Çizikler üzerinde L_{C3} ve L_{C5} kritik yükünün elde edildiği bölgelerin resimleri	82
57. Tek tabakalı TiN kaplama üzerinde gerçekleştirilen çizik testinde normal yüke bağlı olarak AE ve Fz değerlerinin değişimi.....	83
58. Tek tabakalı TiAlN kaplama üzerinde gerçekleştirilen çizik testinde normal yüke bağlı olarak AE ve Fz değerlerinin değişimi.....	83
59. Nanotabakalı AlTiN/TiN kaplama üzerinde gerçekleştirilen çizik testinde normal yüke bağlı olarak AE ve Fz değerlerinin değişimi	84
60. Kaplamaların adezyonlarının karşılaştırılması.....	84
61. Biriktirilen kaplamaların sürtünme katsayıları.....	85
62. WC/Co kesici uçlar üzerine biriktirilen kaplamaların SEM ile elde edilen kırık kesit görüntüleri	86
63. TiN kaplamanın X-ışını kırınım deseni.....	87
64. TiAlN kaplamanın X-ışını kırınım deseni.	87
65. Nanotabakalı nl-AlTiN/TiN kaplamanın X-ışını kırınım deseni.	88
66. 50 m/dak kesme hızında Ti6Al4V alaşımının frezelenmesinde kesici takım aşınma miktarının kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi	89
67. 100 m/dak kesme hızında Ti6Al4V alaşımının frezelenmesinde kesici takım aşınma miktarının kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi	90
68. Farklı kesme hızlarında, 0,1 mm/diş ilerleme ve 1 mm kesme derinliği oranlarında kaplamalı ve kaplamasız takımlar ile 0,8 mm çentikli aşınma derinliğine kadar elde edilen kesme uzunlukları.....	91
69. 50 m/dak kesme hızında iş parçası yüzey pürüzlülüğünün kesme mesafesine bağlı olarak değişimi.....	92
70. 100 m/dak kesme hızında iş parçası yüzey pürüzlülüğünün kesme mesafesine bağlı olarak değişimi	92
71. Farklı kesme hızlarında Ti6Al4V alaşımının frezelenmesinde aşınmış takımların stereo zoom mikroskop görüntüleri	93
72. V_c : 50 m/dak, f_z : 0,1 mm/diş, a_p : 1 mm kesme parametrelerinde aşınmış nanotabakalı nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi	94

Şekil	Sayfa
No	No
73. V_c : 50 m/dak, f_z : 0,1 mm/diş, a_p : 1 mm kesme parametlerinde aşınmış TiAlN kaplamalı kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi	94
74. V_c : 50 m/dak, f_z : 0,1 mm/diş, a_p : 1 mm kesme parametlerinde aşınmış TiN kaplamalı kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi	95
75. V_c : 50 m/dak, f_z :0,1 mm/diş, a_p :1 mm kesme parametlerinde aşınmış kaplamasız kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi	95
76. V_c : 100 m/dak, f_z : 0,1 mm/diş, a_p : 1 mm kesme parametlerinde aşınmış nanotabakalı nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analiz	96
77. V_c : 100 m/dak, f_z : 0,1 mm/diş, a_p : 1 mm kesme parametlerinde aşınmış TiAlN kaplamalı kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi	96
78. V_c : 100 m/dak, f_z :0,1 mm/diş, a_p :1 mm kesme parametlerinde aşınmış TiN kaplamalı kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi	97
79. V_c : 100 m/dak, f_z : 0,1 mm/diş, a_p : 1 mm kesme parametlerinde aşınmış kaplamasız kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi	97
80. 50 m/dak kesme hızında bileşke kuvvetlerin ilerleme oranına bağlı olarak değişimi	98
81. 100 m/dak kesme hızında bileşke kuvvetlerin ilerleme oranına bağlı olarak değişimi	99
82. 150 m/dak kesme hızında bileşke kuvvetlerin ilerleme oranına bağlı olarak değişim	99
83. 0,05 mm/diş ilerleme değerinde bileşke kuvvetlerin kesme hızına bağlı olarak değişimi	100
84. 0,1 mm/diş ilerleme değerinde bileşke kuvvetlerin kesme hızına bağlı olarak değişim	101
85. 0,15 mm/diş ilerleme değerinde bileşke kuvvetlerin kesme hızına bağlı olarak değişimi	102
86. 0,05 mm/diş ilerleme değerinde kesme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi	103
87. 0,1 mm/diş ilerleme değerinde kesme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi	104

88.	0,15 mm/diş ilerleme değerinde kesme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi.....	104
------------	---	-----

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
1. Yaygın olarak kullanılan bazı alaşım elementlerinin stabilleştirici etkileri	7
2. Saf titanyum sınıflarının mekanik özellikleri	9
3. Ti6Al4V alaşımının kimyasal birleşimi	55
4. Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri.....	55
5. Kesme parametreleri ve seviyeleri	72
6. Kesme performansı testlerinde kullanılan deney deseni.....	73
7. Aşınma testlerinde kullanılan kesme parametreleri	76
8. AISI D2 altlıklar üzerine biriktirilen kaplamaların kalınlık değerleri.....	80
9. Biriktirilen kaplamaların sertlikleri.....	81
10. AISI D2 altlıklar üzerine biriktirilen kaplamaların pürüzlülük değerleri.....	85

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a_p	: Eksenel kesme derinliği
Al_2O_3	: Alüminyum oksit
d	: Ölçülen nanoindentasyon izinin köşegen uzunluğu
d_k	: Kaplama kalınlığı
D	: Takım tutucunun çapı
D_b	: Bilye çapı
E^*	: Efektif elastisite modülü
f_z	: İlerleme oranı
F_R	: Bileşke kuvvet
F_x	: x-ekseni doğrultusundaki kesme kuvveti
F_y	: y-ekseni doğrultusundaki kesme kuvveti
F_z	: z-ekseni doğrultusundaki kesme kuvveti
LC	: Kritik yük
R_a	: Ortalama pürüzlülük
TiN	: Titanyum nitrür
$TiAlN$	: Titanyum alüminyum nitrür
$TiAlSiN$	: Titanyum alüminyum silisyum nitrür
V_c	: Kesme hızı
V_B	: Serbest yüzey aşınması derinliği
μ	: Sürtünme katsayısı
ρ	: İş parçası malzemesinin yoğunluğu
ν	: Poisson oranı

KISALTMALAR

BMS	: Dengeli magnetron sıçratma
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
YMK	: Yüzey merkezli kübik
XPS	: X-ray fotoelektron spektroskopisi
XRD	: X-ışını kırınımı
UBMS	: Dengesiz magnetron sıçratma

SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
HSS	: Yüksek hız çeliği
FEM	: Sonlu elemanlar metodu
EDS	: Enerji dağılımlı spektrometre

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Takım tezgâhları aracılığıyla, bir ya da birkaç takım kullanarak, bir iş parçasının talaş kaldırma yöntemiyle önceden belirlenmiş şekil ve ölçülerde işlenmesine “talaşlı imalat” denir. Talaşlı imalatın temel hedefi, üretilecek iş parçasının geometrik ve boyutsal tamlığıyla birlikte yüzey kalitesinin ve çapak yüksekliğinin istenen sınırlar içerisinde ekonomik olarak sağlanmasıdır. Tüm talaşlı şekillendirme proseslerinde iş parçasının imalatı üç ana parametreye bağlıdır. Bu parametreler; iş parçasının malzemesi, kesici takım malzemesi ve şekillendirme işlemidir (Çalışkan, 2012).

Titanyum ve alaşımları, yüksek özgül mukavemet, korozyon direnci, biouyumluluk ve yüksek yorulma dayanımının da içinde bulunduğu dikkat çekici özelliklere ve havacılık, ulaşım, biyomedikal, kimyasal ve petrol endüstrileri gibi geniş bir yelpazede uygulama alanlarına sahiptirler (Riahi ve Edrisy, 2014). Bu sektörlerin çoğunda ve diğer mühendislik uygulamalarında daha ağır, daha az dayanıklı ve daha yüksek maliyetli malzemelerin yerini titanyum almaktadır. Birçok durumda, titanyum, beklenen hizmet ömrünü uzatmakta ve performansı artırmaktadır. Ticari üretimde yaklaşık 25 farklı titanyum alaşımı kullanılmaktadır. Bu alaşımlar faz yapılarına göre dört genel gruba ayrılır:

- Ticari olarak saf,
- Alfa,
- Orta kararlı – Beta alaşımları,
- Alfa- Beta.

Ti6Al4V, çok yaygın olarak kullanılan, yüksek özgül dayanıma, iyi ısı işlem kapasitesine, düşük yoğunluğa, yüksek biouyumluluğa ve yüksek korozyon direncine sahip çift fazlı alfa-beta türü titanyum alaşımıdır. Havacılık ve biyomedikal ağırlıklı olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır (Sima ve Özel, 2010). Ti6Al4V en çok kullanılan titanyum alaşımı olarak bilinmesine rağmen, termomekanik özelliklerinden ve düşük termal iletkenliğinden dolayı (yaklaşık 6,7 W/mK) talaşlı şekillendirilmesi zor olan malzemeler sınıfındadır (Ribeiro, 2003). Titanyum alaşımlarını şekillendirirken üstesinden gelmesi

gereken temel sorun, takım ömrünün kısalması sebebi ile yüksek hızda kesme işleminin yapılamamasıdır. Literatürde Ti6Al4V alaşımının zayıf işlenebilirliğine dair getirilmiş çeşitli açıklamalar bulunmaktadır. Titanyum alaşımlarının kesme işlemi sırasında yüksek sıcaklık oluşmaktadır. Bu alaşımların sahip olduğu düşük ısı iletkenliğinden dolayı, kesme sırasında oluşan ısı yavaş dağılmakta ve kesici takımın ve iş parçasının sıcaklığının aşırı derecede artmasına sebep olmaktadır. Oluşan yüksek sıcaklıklar kesici takımın ömrünü kısaltmakta ve ayrıca işlenen yüzey kalitesini kötüleştirmektedir (Basturk, 2010). Ayrıca titanyumun yüksek kimyasal afinitesinden dolayı, bu malzeme, kesici takım kenarında yığıntı talaş oluşturma eğilimindedir. İyi bir takım ömrü için, Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde kullanılan kesme hızları genellikle 50-60 m/dak aralığındadır. Daha yüksek kesme hızlarında karbür kesici takımların ömürleri kısalmaktadır. Titanyum alaşımlarının işlenmesi sırasında karbür takımlardaki takım aşınması probleminin önüne geçmek için kullanılan yöntemlerden biri, bu takımlar üzerine ince film sert kaplama biriktirilmesidir. Böylece, kaplanmamış karbür kesici takımlara kıyasla daha uzun takım ömrü ve daha iyi iş parçası yüzey kalitesi elde edilebilmektedir (Dandekar ve Shin, 2009).

Yüksek hız ve kuru işleme uygulamalarına olan ihtiyaçların artması kesici takımların geliştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır. Bu gelişim süreci sonunda kesici takımlar, temel olarak aşınma dirençlerini artırmak amacıyla sert ince filmler ile kaplanmışlardır. Titanyumun şekillendirilmesinde kullanılan karbür kesici takımlar da sert kaplamalarla kaplanmaktadır (Holubar vd., 1999). Karbür kesici takımların kaplanmasında sert ve aşınmaya dirençli olmaları sebebi ile nitrürler kullanılmaktadır. En yaygın olanları TiN ve AlTiN'dür. TiN'ün alüminyum ile alaşımlanması durumunda kesici takımların sertlik, aşınma direnci, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direnci gibi özelliklerinde büyük bir iyileşme elde edilmiştir (Mo ve Zhu, 2012). Bilinen en sert 2. malzeme olan kübik yapıdaki bornitrür (c-BN) son yıllarda kullanımı yaygınlaşmış bir kaplama malzemesidir. Bu kaplama ile, karbür kesici takımların aşınma direncinde büyük oranda artış sağlanmıştır. Endüstriyel uygulamalarda çift bileşenli kaplamalarının yeri hala önemli olsa da çok bileşenli kaplamalar daha fazla tercih edilmektedir. Bunun en büyük sebebi çok bileşenli kaplamaların mekanik özelliklerindeki gelişimdir (Sima ve Özel, 2010).

İnce film kaplamaların üretimi için kullanılan yöntemlerden biri fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemidir. Fiziksel buhar biriktirme; katı haldeki ham maddenin yüksek enerji ile

plazma haline getirilerek, kontrollü olarak, kaplanacak malzemenin üzerine biriktirilmesi işlemi olarak özetlenebilir. Fiziksel buhar biriktirme ile üretilen sert kaplamalar sayesinde takım ömrü ve performansı geliştirilmektedir. Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile çok ince kaplamalar elde edilebilmekte ve çok karmaşık olmayan şekilli parçalar kaplanabilmektedir (Mo ve Zhu, 2012).

Bu tez çalışmada, nanotabakalı AlTiN/TiN kaplama karbür kesici takımlar üzerine biriktirilerek Ti6Al4V alaşımının frezelenmesinde bu takımların aşınma direncinin ve ömürlerinin artırılması, işleme maliyetlerinin azaltılması ve kuru kesmenin yapılması sağlanarak soğutma sıvısı kullanımının ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır.

BÖLÜM 2

KURAMSAL TEMELLER

2.1 Titanyum Alaşımları

Titanyum metali yeryüzünde alüminyum, demir ve magnezyum metalleri ardından en yüksek rezerve sahip elementtir. Yer kabuğunun %0,6'sını titanyum oluşturmaktadır. Bu element ilk olarak 1971 yılında İngiliz kimyager olan William Gregor tarafından keşfedilmiştir. Titanyum ismini ise Berlinli Alman kimyager Klapproth 1975 yılında Yunan mitolojisinin titanlarından esinlenerek vermiştir. Yeryüzünde en çok bulunan 4. metal olmasına rağmen titanyumun saflaştırılması hususunda 1940'lı yıllara kadar kayda değer bir gelişme gösterilememiştir. Bu sebepten ötürü titanyumun endüstriyel alanda yerini alması gecikmiştir. 1940 yılında Wilhelm Kroll titanyumu saflaştırmak için kendi adını verdiği Kroll prosesini geliştirmiştir. Bu proses sonucunda titanyum süngeri ya da sünger metal adı verilen gözenekli titanyum yapısı elde edilmiştir. Bu yöntemin keşfedilmesi ile birlikte titanyum içerikli endüstriyel ve ticari uygulamalarda hız kazanmıştır. 1947 yılında ABD silahlı kuvvetleri, savunma sanayi uygulamalarında titanyum kullanımına başlamıştır. Yüksek ergime sıcaklığı, yüksek sıcaklık dayanımı ve düşük yoğunluk özellikleri titanyumunu rakiplerinin önüne geçirmiş ve endüstriyel uygulamalarda sıkça karşımıza çıkmasına sebep olmuştur (Lütjering vd., 2000; Donachie, 1988).

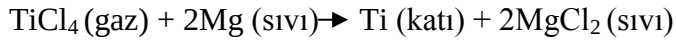
Titanyum demirdışı dışı olarak adledilen hafif bir metaldir. Oldukça düşük yoğunluk değeri ($4,51 \text{ gr/cm}^3$), yüksek akma dayanımı (özellikle $200 \text{ }^\circ\text{C}$ - $450 \text{ }^\circ\text{C}$ aralığında), $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den düşük sıcaklıklarda iyi oksidasyon dayanımı, yüksek korozyon direnci, yüksek özgül dayanımı, biyolojik açıdan uyumluluğu ve dekoratif görünüşü ile titanyum, ticari uygulamaların vazgeçilmez bir parçasıdır (Donachie, 1988).

2.1.1 Titanyumun Üretimi

Cevher halindeki titanyum mamul hale gelinceye kadar dört ana safhadan geçmektedir:

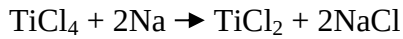
- Titanyum cevherinin indirgenerek sünger metal haline getirilmesi,
- Sünger metalinin ergitilerek ingot oluşturulması,
- İngotların yarı mamul haline getirilmesi,
- Yarı mamullerin imal usulleriyle mamul hale getirilmesi.

Titanyum sünger üretiminde ilk evre, titanyum içeren rutil (TiO_2) cevherinin klorlanmasını kapsar. Klor (Cl) ve kok kömürü, titanyum tetraklorür (TiCl_4) üretmek için rutil (TiO_2) cevheri ile birleştirilir, daha sonra TiCl_4 kapalı bir sistemde $773\text{ }^\circ\text{C}$ 'den $813\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye magnezyum (Mg) ile reaksiyona sokulur. Yan ürünler titanyum sünger ve magnezyum klorür (MgCl_2)'dür.

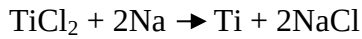


Burada Kroll-leach işlemi veya vakum damıtma işlemi kullanılır. Mg ve MgCl_2 yeniden işleminden geçirilmek için uzaklaştırılır.

Diğer bir titanyum üretim yöntemi olan Hunter işleminde ise TiCl_4 , magnezyum (Mg) yerine sodyum (Na) ile reaksiyona sokulur. Hunter işleminin avantajı, TiCl_4 'ün indirgenmesinin iki aşamada yapılabilmesidir.



Hunter işleminin ikinci aşamasında, TiCl_2 ve NaCl içeren eriyik, argon (Ar) gazının üst atmosferine sahip bir sinter potasında ilave sodyum (Na) ile reaksiyona girer.



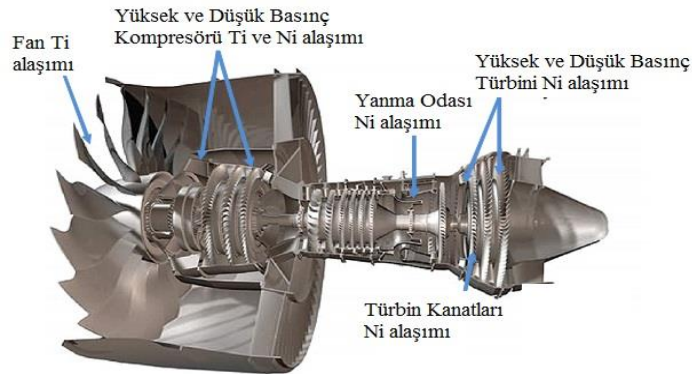
Bu reaksiyon $1037\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altında bir sıcaklıkta yapılır. Hunter işleminde ilk aşamada çok büyük miktarda ısı serbest bırakıldığı için ikinci aşama sırasında yakın sıcaklık kontrolü sürdürülebilir (Leyens ve Peter, 2003).

2.1.2 Titanyumun Kullanım Alanları

Titanyum alaşımları çeşitli uygulamalarda kullanım alanı bulmaktadır. Bu alaşımların yüksek korozyon direnci kimya, petrokimya ve denizcilik endüstrisinde tercih edilmelerini sağlamaktadır. Titanyum alaşımının biouyumluluk özelliği sağlık sektörü uygulamaları açısından bu metali değerli kılmaktadır. Hasara uğramış ya da kırılmış vücut parçaları titanyumdan yapılmış yapay dizler, kalça implantları ve diş gibi parçalarla tamamlanabilmektedir (Şekil 1a). Günlük hayatta kullandığımız bazı araç ve gereçlerde titanyumun uygulama alanlarındadır. Bunlara örnek olarak kameralar, saatler, mücevherler ve spor malzemeleri verilebilir. Ancak titanyumun en fazla kullanıldığı alan havacılık sektörüdür. Titanyum alaşımları kompresör diskleri, jet motoru bıçakları, uçak gövde yapıları, uzay roketleri ve uydu yapımında kullanılmaktadır (Şekil 1b). Havacılık sektöründe titanyum alaşımlarının yaygın olarak kullanılmasındaki temel sebep titanyumun sahip olduğu yüksek özgül dayanım oranıdır (Weiss vd., 1986; Semiatin vd., 1997).



a)



b)

Şekil 1: Titanyum alaşımlarının uygulamaları a) Diş implantları, b) Bir jet motoru (Ulutan ve Özel, 2011).

2.1.3 Titanyum Alaşımının Sınıflandırılması

Saf titanyumun sıcaklığı 882 °C üstüne çıktığında allotropik dönüşümler geçirmektedir. Hegzagonal sıkı paket formundaki α fazları, kübik hacim merkezli β fazlarına dönüşür. Titanyumun içerisindeki alaşım elementleri faz yapısında üç çeşit etkiye sebep olmaktadır:

- α - β geçiş sıcaklığını yükselterek α fazını stabilize etmek,
- α - β geçiş sıcaklığını azaltarak β fazını stabilize etmek,
- Sadece katı çözeltili sertleştirme etkisi göstererek geçiş sıcaklığına etki etmemek (Pederson vd., 2001).

Arayerlerde bulunan oksijen, karbon ve azot atomları α -stabilleştirici güçlü bir etkiye sahiptir, bu sebeple geçiş sıcaklığını yükseltirler. Diğer yandan arayerde bulunan hidrojen atomları ise β -stabilleştirici özellikte olup geçiş sıcaklığını düşürmektedir. Titanyum yapısındaki arayer atomlarının artışı sertlik değerinin artmasına sebep olur. Ayrıca sünekliğin de azalmasına yol açarlar ki bu da bazı durumlarda yapıda kırılmalar meydana gelmesine sebebiyet verebilir (Pederson vd., 2001). En yaygın alaşım elementleri ve bunların stabilizasyona etkisi Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1: Yaygın olarak kullanılan bazı alaşım elementlerinin stabilleştirici etkileri (Pederson vd., 2001).

Alaşım Elementi	Etki Aralığı (%)	Yapıya Etkisi
Alüminyum	2-7	Alfa- stabilleştirici
Kalay	2-6	Alfa- stabilleştirici
Vanadyum	2-20	Beta- stabilleştirici
Molibden	2-20	Beta- stabilleştirici
Krom	2-12	Beta- stabilleştirici
Bakır	2-6	Beta- stabilleştirici
Zirkonyum	2-8	Alfa ve beta sertleştirici etki
Silisyum	0,2-1	Yorulma dayanımında artış

Titanyum alaşımları faz yapılarına göre ve içerisinde bulundurdıkları alaşım elementi oranlarına göre dört ana gruba ayrılmaktadır.

- Alaşımlandırılmamış (saf) Titanyum,
- Alfa (α) Titanyum Alaşımları,
- Alfa-Beta ($\alpha+\beta$) Titanyum Alaşımları,
- Beta (β) Titanyum Alaşımları.

2.1.3.1 Alaşımlandırılmamış (saf) Titanyum

Saf titanyum birkaç grupta sınıflara (grade) ayrılmaktadır. Bu sınıflarda temel farkı yaratan etken oksijen miktarıdır. Yüksek saflığa sahip sınıflar düşük dayanım, sertlik ve dönüşüm sıcaklığı değerlerine sahiptirler. Saf titanyum yüksek dayanım istenmeyen fakat iyi korozyon direnci istenen uygulamalarda tercih edilmektedir. Ticari açıdan önemli 4 adet saf titanyum sınıfı bulunmaktadır. Bunlar 1, 2, 3 ve 4. sınıflardır. 1 numaralı sınıf, en düşük dayanıma, oldukça iyi soğuk şekillendirme kabiliyetine ve yüksek korozyon direncine sahiptir. Derin çekme uygulamaları ve çelik reaktörleri için örtücü alaşım olarak kullanılmaktadır. Sınıf 2, 390 ile 540 MPa aralığında çekme dayanım değerleri ile saf titanyum sınıfları arasındaki en popüler sınıftır. Sınıf 3, basınçlı kaplarda kullanım alanı bulmaktadır. Sınıf 4 ise 740 MPa ile en yüksek dayanım değerine sahiptir ve montaj işlemleri için kullanılmaktadır (Lütjering, 1998; Pederson vd., 2001). Ticari saflıkta sınıfların genel özellikleri Tablo 2 'de gösterilmiştir

Tablo 2: Saf titanyum sınıflarının mekanik özellikleri (Sıcakyüz, 2007).

ASTM STANDARDI	Akma Mukavemeti (Mpa)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Dönüşüm Sıcaklıkları (°C)		Katkı Elementleri (% ağırlıkça)					
			Alfa	Beta	N	C	H	Fe	O	Pd
Grade 1	170	240	888	880	0,03	0,10	0,015	0,20	0,18	0
Grade 2	280	340	913	890	0,03	0,10	0,015	0,30	0,25	0
Grade 3	380	450	920	900	0,03	0,10	0,015	0,30	0,35	0
Grade 4	480	550	950	905	0,03	0,10	0,015	0,50	0,40	0

2.1.3.2 Alfa (α) Titanyum Alaşımları

Alüminyum ve kalay gibi alfa-stabilleştirici içeren saf titanyum ve titanyum alaşımları olağan sıcaklıklarda hegzagonal sıkı paket yapısına sahip olurlar. Bu yüzden bu fazlara sahip yapılar alfa alaşımları olarak sınıflandırılır. Bu alaşımlara örnek olarak Ti-5Al-2,5Sn alaşımı verilebilir. Alfa alaşımları temel olarak kimya ve proses mühendisliği endüstrisinde kullanılırlar. Mükemmel korozyon davranışları ve işlenebilirlikleri, yüksek dayanım yeteneklerini ikinci plana atan en önemli özellikleridir. Alfa alaşımları ısıtılma işlemiyle sertleştirilemezler fakat tavlama ya da rekristalizasyon işlemi uygulanarak artık gerilmelerin giderilmesi sağlanabilir. Ayrıca, bu alaşımların döküm özellikleri oldukça iyidir (Lütjering, 1998; Pederson vd., 2001).

2.1.3.3 Alfa-Beta ($\alpha+\beta$) Titanyum Alaşımları

Alfa-beta sistemine ait alaşımlar, bir ya da daha fazla alfa-stabilleştirici ya da çözünmüş alfa elementini ve bir ya da daha fazla beta-stabilleştirici elementini birlikte içermektedirler. Oda sıcaklığında genelde bu alaşımlar beta-stabilleştirici miktarına bağlı olarak alfa-beta karışımı şeklinde bir içyapı meydana getirmektedirler. Bu alaşımlar süneklik, homojenlik ve dayanım değerlerini arttırmak amacıyla tavlama işleminden

geçmektedirler. Bu işlemin temel amacı, beta tanelerinin büyümesini durdurmak ve yeni alfa taneleri oluşturmaktır. Hızlı soğutma iğnemsiz, yavaş soğutma ise eşeksiz tane oluşumunu sağlamaktadır (Lütjering, 1998; Pederson vd., 2001).

En çok bilinen ve ticari kullanımı olan alfa-beta alaşımı Ti6Al4V'dır. İçeriğinde %6 alüminyum ve %4 vanadyum bulunmaktadır. Levha, ekstrüzyon, tel ve çubuk gibi farklı biçimlerde üretimi yaygındır. Isıl işlem vasıtasıyla alaşımın çekme dayanımı 1137 MPa değerlerine kadar yükseltilebilmektedir. Sertleştirilebilme kabiliyeti zayıftır. Alfa-beta alaşımlarının yoğunluğu oldukça düşüktür. Bu da Ti6Al4V alaşımının tercih edilmesinde bir numaralı etken olan dayanım/yoğunluk oranının yüksek olmasını sağlamaktadır. Ti6Al4V alaşımı savunma sanayi uygulamaları, uzay endüstrisi, havacılık uygulamaları ve sağlık sektörü uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Lütjering, 1998; Pederson vd., 2001).

2.1.3.4 Beta (β) Titanyum Alaşımları

Beta alaşımları içeriklerinde yüksek değerlerde β -stabilleştirici alaşım elementleri bulundurulur. Sertleştirilebilme, dövülebilirlik, soğuk şekillendirilebilme ve de yüksek yoğunluk gibi özellikleriyle diğer titanyum alaşımlarından farklılık göstermektedirler. Bu alaşımlar oda sıcaklığında $\alpha+\beta$ alaşımları ile aynı mukavemet değerlerine sahip olmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda bu değerler $\alpha+\beta$ alaşımlarından sonra gelmektedir. β alaşımları kararsız alaşımlardır ve α fazının β matrisi içinde çökeltilmesi ile sertleştirilirler. Yüksek kırılma tokluğuna sahip olup, molibden içermeleri bu alaşımların korozyona karşı direncini artırmaktadır, $\alpha+\beta$ alaşımlarına göre daha iyi işlenebilirlikle beraber ısıl işleme daha yatkın olduğu bilinmektedir (Lütjering, 1998; Pederson vd., 2001).

2.2 Titanyum Alaşımının Isıl İşlemleri

Titanyum alaşımlarının özellikleri üzerinde mikro yapının azımsanamayacak kadar büyük bir etkisi vardır. Titanyum alaşımlarının mikro yapıları belli derecelere kadar ısıl işlem aracılığı ile kontrol edilebilmektedir. Isıl işlemdeki temel amaç dönüşüm mekanizmasını yavaşlatmak ya da bozmaktır. İstenen mikro yapı ve beklenen mekanik özelliklere göre titanyum alaşımları tavlanabilir, yaşlandırılabilir, kimyasal ısıl işleme tabi tutulabilir ya da

sertleştirilebilirler. Titanyum ve titanyum alaşımlarına; üretim sırasında oluşan artık gerilmelerin giderilmesi, özellikle alfa-beta alaşımlarında en uygun süneklik, işlenebilirlik, boyutsal ve yapısal kararlılık değerlerinin elde edilmesi, çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemleri ile dayanımın artırılması ve kırılma tokluğu, yorulma dayanımı ve sürünme dayanımı gibi özelliklerin optimize edilmesi amacıyla ısıtıl işlem uygulanır. Alfa alaşımlarının mikro yapıları faz yapısındaki değişimlerin az olması sebebi ile ısıtıl işlem ile çok fazla değiştirilemez. Alfa-beta alaşımları yaşlandırma, çözeltiye alma gibi ısıtıl işlemler ile yüksek sertlik değerlerine çekilebilir. Beta alaşımları için ise gerilim giderme tavlama, yaşlandırma, tavlama ve çözeltiye alma ısıtıl işlemi idealdir (Matthew ve Donachie, 2000).

Sınıf (Grade) 5 Ti6Al4V alaşımının gördüğü ısıtıl işlemler şöyledir:

- 927 °C-1038 °C arasındaki sıcaklıklarda yüksek sertlik, çekme dayanımı ve yorulma dayanımı elde etmek için tavlama işlemi,
- 1-8 saat arasında 691 °C ile 760 °C arasındaki sıcaklıklarda gerilim giderme tavlama işlemi,
- 913 °C-954 °C arasında uygulanan çözündürme ısıtıl işlemi,
- Son olarak, 524 °C ile 552 °C aralığında gerçekleştirilen yaşlandırma işlemi (URL-1, 2011).

2.3 Sert Kaplamalar

Kesici takımlar, üretim sürecinin en önemli bölümünü oluşturur. Başarılı ve ekonomik üretimin en önemli özelliği takım malzemesinin iş parçasından daha sert olmasıdır. Bu nedenle, takımlar genellikle çelik, sinterlenmiş karbür, seramik ve sermet gibi malzemelerden yapılmaktadır. Birçok modern malzemenin üretim sürecinde, bu kesici takım malzemeleri yeteri kadar sert değildir ve hızlı aşınırlar, bu yüzden bu takımlar kullanılarak gerçekleştirilen üretimin verimliliği düşük, maliyeti ise çok yüksektir. Daha iyi mekanik özelliklere sahip malzemeler ile verimlilik artırabilir, ancak büyük miktarlarda yeni malzeme geliştirme hem çok zor hem de pahalıdır ve zaman zaman pratiğe geçirilmesi imkânsızdır. Özellikle karbür kesici takımların yüzey özelliklerini geliştirmenin en iyi yolu takım yüzeylerine sert kaplamalar biriktirilmesidir. Pek çok durumda, bu tür kombinasyonlar, tek bir altlık ile birlikte aşınma dirençli bir yüzey elde

edilmesini sağlamaktadır. Günümüzde, endüstriyel üretim süreçlerinin çoğunda kullanılan takımlar sert kaplamalar ile kaplanmaktadır (Cselle ve Barimani, 1995).

Sert kaplamalar, yığın malzemenin temel özelliklerini kaybetmeden, yüzeyin sertlik, sürtünme, aşınma direnci ve korozyon direnci gibi özelliklerini geliştirmek üzere yığın malzemenin üzerine biriktirilen ince filmlerdir. Sert kaplamalar, takımların (kesme ya da şekillendirme takımları) ve takım parçalarının üzerine takım ömrünü artırmak, yağ tüketimini azaltmak, verimliliği artırmak ve yeni malzemeler üretebilmek amacıyla biriktirilmektedir. Sert kaplamalar, modern takım teknolojisinin büyük bir parçası olmuş ve daha iyi mekanik özelliklere sahip kaplama malzemesi üretimi ve yeni biriktirme teknikleri üzerine araştırmalar devam etmektedir (Cselle ve Barimani, 1995).

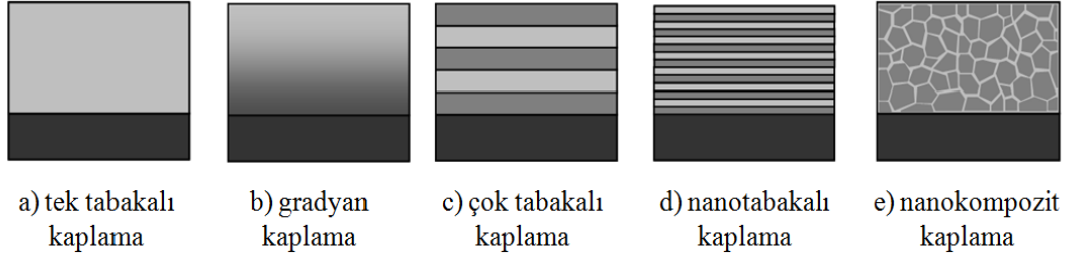
Kaplama ve altlık kombinasyonları takım performansını belirleyen önemli ölçütlerdir. Kesme uygulamalarında, iyi adezyon özelliğine sahip sert kaplamalardan daha iyi randıman alınmaktadır. Buna rağmen, takım performansı tribolojik sisteme göre değişmektedir. İş parçası ve kaplanmış takım arasındaki temas aşınma direncini belirler. Evrensel bir kaplama yoktur, bu yüzden her tribolojik sistem için optimal çözüm farklı olabilir. Bu nedenle spesifik uygulamalar için farklı kaplamalar geliştirilmiştir (Cselle ve Barimani, 1995).

2.3.1 Sert Kaplama Malzemeleri ve Tasarımı

Sert kaplama malzemeleri ağırlıklı olarak nitrür, karbür, borür ve geçiş metallerinin oksitlerinden meydana gelmektedir. Endüstriyel üretimde üretilen tipik nitrürler: TiN, (Ti,Al)N, (Ti,Si)N, CrN, (Cr,Al)N, c-BN ve karbürler ise: TiC, CrC ve WC' dir. Aynı zamanda Ti(C,N) gibi karbonitrürler de yaygın olarak üretilmektedir. Daha küçük bir kapsamda, bor kaplamalar da biriktirilmektedir (örn: TiB₂). Al₂O₃ gibi oksit kaplamalar genellikle CVD prosesleri ile üretilmektedir, buna rağmen artık PVD teknikleri kullanılarak da biriktirmeye başlanmıştır. Düşük sürtünme özelliklerine sahip olan ve birçok uygulamada kullanılan farklı bir sert kaplama grubu ise elmas benzeri karbon kaplamalardır (DLC). CN_x, MoS₂ ve WS₂ katı yağlayıcı olarak kullanılan kaplamalardandır (Quinto, 2007).

Kaplamalar tek bir tip malzeme ya da farklı yapıdaki malzeme kombinasyonları şeklinde biriktirilmektedir. Bu sebeple, sert kaplamalar tasarımlarına görede sınıflandırılmaktadır. Sert kaplamaların en basit yapısı tek tabakalı yapıdır (Şekil 2a), buna örnek olarak da 3-5 μm kalınlığındaki TiN gösterilebilir. Eğer kompozisyon, kaplama kalınlığına göre değişirse, gradyan kaplamalar (Şekil 2b) elde edilmektedir. Gradyan kaplamalara örnek olarak biriktirme sırasında karbon ve nitrojen atomlarının arasındaki oranın değiştiği Ti(C,N) verilebilir. Çok tabakalı kaplamalar (Şekil 2c), iki ya da daha fazla malzemenin art arda sıralandığı kombinasyonlardır, örnek olarak TiN/CrN kaplamalar verilebilir. Bu kaplamalarda tabakaların kalınlığı 0,1 ve 1 μm arasında değişmektedir. Kaplamaların özel bir diğer sınıfı ise nano yapıli kaplamalardır. Bu kaplamalar geleneksel kaplamalara göre yüksek sertlik gösterirler. Nano yapıli kaplamalar nanotabakalı (Şekil 2d) ve nanokompozit kaplamalar (Şekil 2e) olarak ikiye ayrılır. Nanotabakalı kaplamalar, iki ya da daha fazla farklı malzemenin (örn: TiN/NbN), nano ölçekte tabaka kalınlığında sıralı olarak biriktirilmesiyle elde edilmektedir. Nanotabakalı kaplamalarda, tek tabakalı kalınlığı genel olarak 10 nm civarındadır, çok tabakalı kaplamalarda ise mikrometre seviyesinde ancak 100 nanometreden fazladır. Nanokompozit kaplamalar, spinodal faz ayrışımına göre termodinamik olarak meydana gelen, iki fazdan oluşan izotropik malzemelerdir. Bu kaplamalarda, tanelerin boyutu nanometre aralığındadır ve bir faz, diğer fazdan tane sınırıyla ayrışır. Nanokompozit kaplamalara örnek olarak, amorf SiN_x içine gömülmüş TiN nano kristal yapı verilebilir (Panjan, 2010). Özel uygulamalarda kullanılan sert kaplamaların başarısı birçok gereksinime bağlıdır:

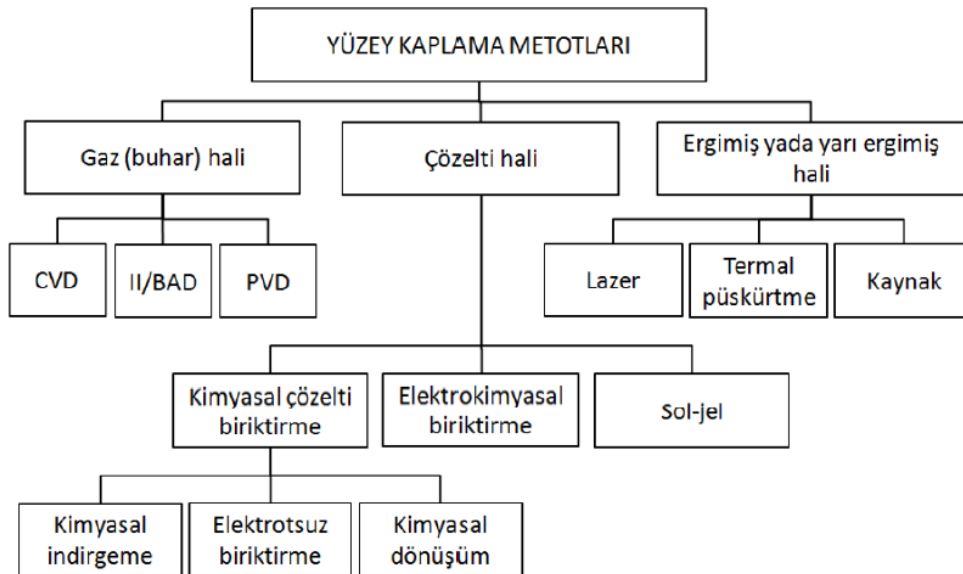
- Altlığa ve çok tabakalı durumlarda tabakalar arası iyi adezyon,
- Takımın çalışma sıcaklığında yüksek sertlik,
- Kimyasal stabilite ve iş parçası malzemesine karşı inertlik,
- İnce taneli mikro yapı,
- İyi oksidasyon direnci,
- Düşük termal iletkenlik katsayısı,
- Düşük sürtünme katsayısı,
- Basma gerilmesi ile çatlamanın geciktirilmesi.



Şekil 2: Sert kaplamaların tasarımı (Panjan, 2010).

2.3.2 Sert Kaplamaların Biriktirilmesi

Şekil 3’de görüldüğü gibi kaplamalar gaz hali, çözelti hali ve erimiş ya da yarı erimiş hali olmak üzere 3’e ayrılmaktadır. Bu proseslerin her biri kendi içinde farklı biriktirme tekniklerine ayrılmaktadır. Gaz hali prosesi kimyasal buhar biriktirme (CVD), iyon implantasyonu/iyon demeti (II/IBAD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) olarak üç farklı bölüme ayrılmıştır. Çözelti hali prosesi, kimyasal çözelti biriktirme, elektrokimyasal biriktirme ve sol-gel teknikleri olarak ayrılmıştır. Erimiş ya da yarı erimiş hal prosesleri ise lazer biriktirme, termal püskürtme ve kaynak tekniklerinden oluşmaktadır. Pratikte bu proseslerin çok farklı çeşitleri bulunabilir. Bu teknikler kullanılarak imal edilen kaplama kalınlıkları birkaç nanometre ile 10 mm arasında değişmektedir (Şekil 3). Biriktirme sıcaklığı da aynı şekilde oda sıcaklığı ile 1000 °C ve daha fazlası arasında geniş bir yelpazede değişmektedir (Holmberg ve Matthews, 2009).



Şekil 3: Yüzey mühendisliği tekniklerinin genel sınıflandırılması (Holmberg ve Matthews, 2009).

Gaz durumunda biriktirme proseslerinin iki ana grubu kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemleridir. CVD prosesinde, bir malzeme buhar fazından kimyasal reaksiyon ile ısıtılmış bir altlık üzerine biriktirilmektedir. PVD prosesinde ise, katı bir madde (hedef), kaplama oluşturmak için öncelikle fiziksel olarak (buharlaştırma veya sıçratma) gaz haline getirilmekte, daha sonra bir altlık üzerine biriktirilmektedir (Holmberg ve Matthews, 2009).

2.3.2.1 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)

Fiziksel buhar biriktirme proseslerinde, malzeme katı bir kaynaktan (hedef) buharlaştırılır ve daha sonra kaplama oluşturmak için altlık üzerine biriktirilir. Malzemeyi buharlaştırma metoduna göre, PVD prosesleri buharlaştırma ve sıçratma olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Buharlaştırma işleminde, malzeme ısıtılarak buharlaştırılır. Hedef madde, dirençli ısıtma, indüksiyon ısıtma, elektron ışın kaynağı, katodik ark ya da lazer demeti yoluyla buharlaştırılır. Sıçratma işleminde ise, hedef madde, inert bir gaz ile (örn: Ar) hedefe iyon bombardımanı yapılarak buharlaştırılır. İyonlar plazmadan ya da ayrı bir iyon kaynağından elde edilir. Sıçratılan partiküller mikroyapıyı, adhezyonu ve kaplamanın diğer özelliklerini önemli derecede etkilemiştir ve buharlaştırılan partiküllere göre daha yüksek kinetik enerjiye sahip olmuştur. PVD prosesleri, kaynaktan altlığa giden yolda parçacıkların artık gaz ile çarpışmamasını sağlayan yüksek vakum içinde çalışır. Buharlaştırma ve sıçratma tekniklerinin ikisi de uzun süredir bilinmekte ve kullanılmaktadır (Panjan, 2010).

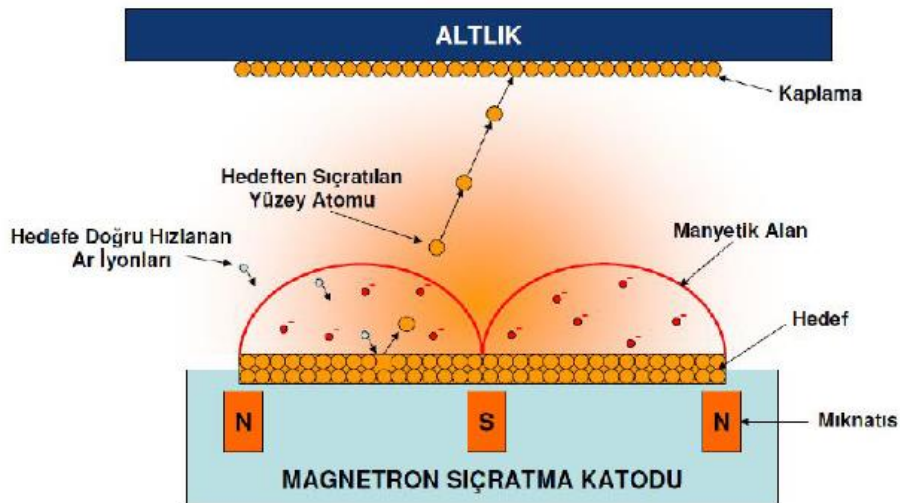
Teknolojik PVD süreçlerinin çoğunluğu iyon kaplama kullanmaktadır. İyon kaplamada altlığa negatif voltaj uygulanır. Bu durum iyonların plazmadan hızlanmasına ve daha sonra altlığa bombardıman uygulamasına neden olur. PVD başlangıçta metal kaplamalar için kullanılmış olsa da, bileşik kaplamaların biriktirilmesi için de kullanılmıştır. Bileşikler, bileşik hedefler ile ya da reaktif biriktirme ismi verilen yöntem ile biriktirilmektedir. Reaktif biriktirmede, vakum odasının içine reaktif gaz (örn: nitrojen veya oksijen) gönderilmektedir. Bu gaz, buharlaşmış ya da sıçratılmış parçacıklarla tepkimeye girerek ve bileşik oluşturur. Bu sebeple, farklı stokiyometrilere nitrür, oksit ya da karbür kaplamalar üretilmektedir. Bununla beraber, çok elemanlı bileşikler ya da kompozit kaplamalar reaktif biriktirme ile kolayca biriktirilmektedir. PVD işlemi, biriktirme prosesi boyunca kullanılan güç kaynağı çeşidine göre de sınıflandırılmaktadır. Temel güç kaynağı, iletken maddelerin biriktirilmesinde kullanılan doğru akım (DC)'dir. Yalıtkan maddelerin biriktirilmesi için

ise yüksek frekans, orta frekans ya da darbeli güç kaynakları kullanılmaktadır. Son yıllarda, kısa ve yüksek güç darbeli güç kaynakları geliştirilmiştir. Böylece yüksek iyonlaşma derecesine sahip plazmalar elde edilmektedir (Panjan, 2010).

2.3.2.2 Magnetron Sıçratma

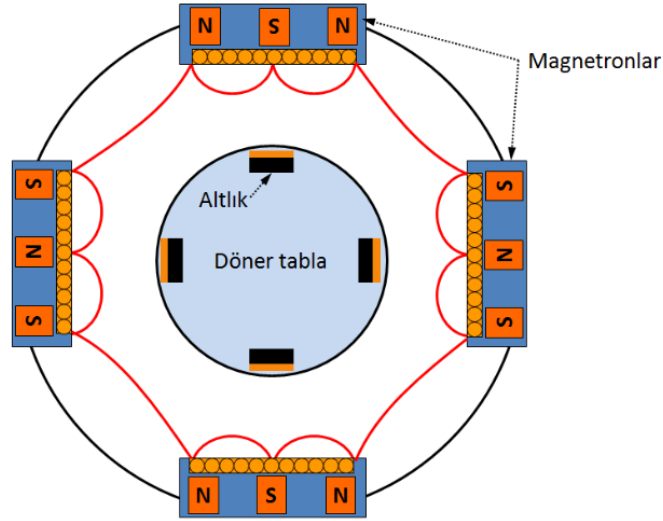
Magnetron sıçratma, ince film biriktirmek için kullanılan çok yönlü ve yaygın bir tekniktir. Bu teknik, metallerin, alaşımların ya da bileşiklerin biriktirilmesinde ve yarı iletken malzemelerin ince film metal kaplanması, manyetik filmler, kuru film yağları, sert kaplamalar ve dekoratif kaplamalar gibi çok çeşitli alanlarda kullanılır (Panjan, 2010).

Manyetik alan hedefe yakın olması durumunda, sıçratma oranı fazlasıyla artabilir. Magnetronlarda temel prensip olarak, hedef yüzeyine paralel olarak düzenlenmiş bir manyetik alan tarafından, ikincil elektronlar hedef yüzeyi etrafında hareket etmeye zorlanmaktadır. Mıknatısların bir kutbu hedefin merkezine yerleştirilmiş, ikinci kutbu ise, bir mıknatıslar halkası oluşturacak şekilde hedefin dış kenarı üzerinde dizilmişlerdir. Bu şekilde elektronlar tuzağa düşürülerek, iyonlaşma için elektron-argon atomu çarpışması olayının olasılığı büyük ölçüde arttırılmaktadır. Bir magnetronun iyonlaşma verimliliği arttığında, sonuç olarak hedef bölgesinde yoğun bir plazma oluşmaktadır. Böylece, daha yüksek sıçratma oranları ile hedefin iyon bombardımanı artmakta ve bu yüzden altlık üzerinde daha yüksek biriktirme elde edilmesi sağlanmaktadır (Şekil 4) (Panjan, 2010).



Şekil 4:Magnetron kaynağının şematik görüntüsü (Çalışkan vd., 2010).

Kapalı alan konfigürasyonunda (Şekil 5), magnetronlar arasındaki magnetik alan çizgileri plazmadaki elektronlar için kapalı bir tuzak oluşturmaktadır. Bu yüzden, daha az elektron oda duvarlarına kaçmakta ve büyütülen film için yüksek seviyede iyon bombardımanı sağlanarak yoğun bir plazma altlık bölgesinde sürdürülmektedir. Endüstriyel üretim için, ark buharlaşma ve magnetron sıçratma sisteminin birleştirildiği hibrit sistemler de geliştirilmiştir. Bu biriktirme sistemleri (Münz, 1991) tarafından geliştirilmiştir. Hibrit prosesi, başlangıç aşındırma adımı, magnetron sıçratma kaplamanın kusursuz adezyonunu sağlamak için ark kaynaklarını kullanır. Bu durum aşındırma adımının süresini oldukça azaltır ve sıçratılmış kaplamanın adezyonunu ve yoğunluğunu artırır (Panjan, 2010)



Şekil 5: Kapalı alan dengesiz magnetron sıçratma sisteminin şematik gösterimi (Çalışkan, 2010).

2.3.3 Tabakalı Kaplamaların Biriktirilmesi

Tabakalı kaplamalar, çok tabakalı ve nanotabakalı olmak üzere, CVD ya da PVD teknikleriyle üretilir. CVD prosesinde, ayrı tabakalar art arda gelen çeşitli gazların aracılığıyla biriktirilir. Buna rağmen, CVD ince tabakalardan oluşan, tabakalı kaplama biriktirilmesinde en çok kullanılan yöntemdir. PVD prosesinde, farklı hedeflerden gelen maddelerin sırayla biriktirilmesiyle tabakalar oluşur. Biriktirme için en yaygın kullanılan teknik magnetron sıçratma ve ark buharlaştırmadır (Ziebert ve Ulrich, 2006).

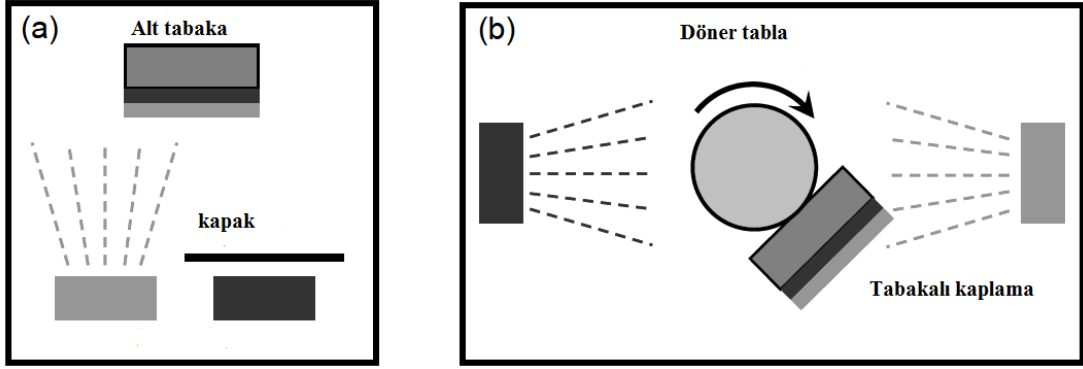
Tabakalı kaplamaların biriktirilmesi için PVD tekniğinde kullanılan üç farklı prensip vardır:

- (a) Hedefler arası sıralı geçiş,
- (b) Farklı hedefler boyunca altlığa döndürerek ve,
- (c) Reaktif gaz akışını değiştirme prensipleri kullanılmaktadır.

İki ya da daha fazla hedef arasında sıralı geçiş işleminde (Şekil 6a), malzeme, mekanik bir kapak kullanılarak ya da hedefler arasında gücün geçişini sağlayarak sırayla biriktirmektedir. Bu tekniğin dezavantajı ise geniş altlıklar üzerinde film kalınlığının uniform dağılıma sahip olmamasıdır. Bu prensip deneysel biriktirme sistemlerinde en yaygın kullanılan tekniktir (Panjan, 2010).

Farklı hedefler boyunca altıkları döndürme işlemi tabakalı kaplamaların endüstriyel biriktirmesinde kullanılır. İki hedef kullanılarak oluşturulmuş biriktirme sistemi Şekil 6b’de gösterilmektedir. Endüstriyel biriktirme sistemleri genellikle hedeflerin, bir dikdörtgenin dört köşesine yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Altlıklar, hedeflerin çapraz olarak birbirini etkilemesini azaltmak amacıyla yeterince geniş olan döner tablanın üzerine monte edilmiştir. Endüstriyel biriktirme sistemlerinde karşılaşılan zorluk, altlıkların iki ya da üç eksen çevresinde gezegensel bir yörünge çizmesidir. Kesici takımlar gibi karmaşık geometriye sahip altlıklar üzerinde, uniform bir kalınlık sağlamak için buna ihtiyaç duyulmaktadır (Panjan, 2010).

Biriktirme boyunca reaktif gaz akışını değiştirme işlemi nadiren kullanılmaktadır (Springer ve Catlett, 1978). Bu yöntem sadece Al/AlN ya da Ti/TiN gibi metal/seramik kaplamaların biriktirilmesinde kullanılır.



Şekil 6: Tabakalı kaplamaların biriktirilmesi için kullanılan iki farklı metodun şematik gösterimi: (a) İki hedef arası sıralı geçiş (b) İki hedef boyunca altlıkların döndürülme işlemi (Panjan, 2010).

2.3.4 Çok Tabakalı Sert Kaplamalar

Kesici takımların yıpranmasının önlenmesi için korunması için kullanılan ilk çok tabakalı kaplamalar CVD tekniğiyle biriktirilmiştir. Kalınlığı birkaç mikrometre arasında değişen TiN ve Ti(C,N) tabakalarından oluşan bu kaplamalar kesici takımın ömrünü uzatmıştır. Çok tabakalı kaplamalar, tek tabakalı titanyum nitrid kaplamaların yetersiz kaldığı bazı uygulamalarda çok iyi performans göstermişlerdir (Panjan, 2010).

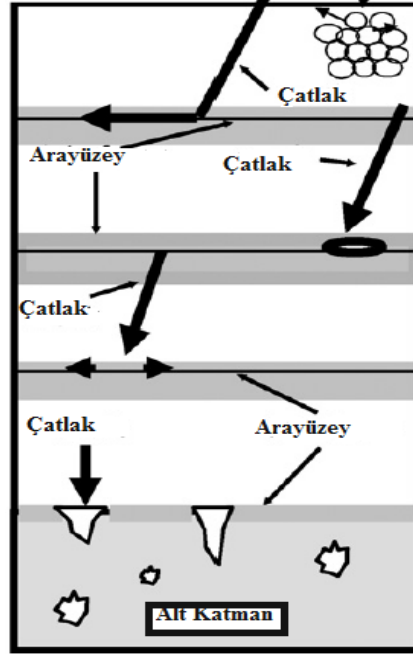
Günümüzde, birçok sert kaplama, çok tabakalı şekilde biriktirilmektedir. Çok tabakalı kaplamalar hem CVD hem de PVD yöntemi ile üretilmektedir ve 1970'lerden bu yana ticari olarak kullanılmaktadır. Kesici takım uygulamalarında kullanılan CVD yöntemiyle üretilmiş en başarılı çok tabakalı kaplamalar TiN/TiC/Al₂O₃'tür (Schintlmeister vd. 1984). Bu çok tabakalı kaplamalar 20'den fazla tabakadan oluşmakta ve her tabakanın kalınlığı 0,5 µm civarında olup toplam kalınlık 5 ve 10 µm arasındadır. Tabakalar genellikle rastgele düzenlenmiştir, buna rağmen her birinin kendine özgü fonksiyonu vardır. Çok tabakalı kaplamaların amacı, farklı malzemelerin pozitif özelliklerini birleştirerek daha iyi performans elde etmektir (Panjan, 2010).

Çok tabakalı kaplamaların birçok avantajı vardır. Öncelikle, çok tabakalı tasarımın amacı farklı kaplama malzemelerinin istenen özelliklerini birleştirerek yeni özellikler katmaktır. Çok tabakalı yapıda, farklı tribolojik fonksiyonlara sahip malzemelerin özelliklerini kombine etmek mümkündür. Her tabakanın kalınlığı aracılığıyla kullanılan malzemenin

miktarı değiştirilerek, özellikler geniş ölçüde değişebilir. Bu sebeple, çok tabakalı yapıda kaplamanın istenen özellikleri kolayca elde edilebilir. Tabakaların düzenlenmesi, sertlik, pürüzlülük, gerilim, oksidasyon direnci ve yıpranma özelliklerine dikkat edilerek uygun hale getirilir. Çok tabakalı tasarım yalnızca tribolojik uygulamalarda değil, optik, manyetik, elektronik ve diğer uygulamalarda da yaygın bir şekilde kullanılır (Panjan, 2010).

Çok tabakalı kaplamaların bir diğer avantajı, kaplamadan altlığa yumuşak bir geçiş sağlamak için ara yüzey tabakalarının kullanılmasıdır. Tabakalar arası ara yüzeylerin, çok tabakalı kaplamaların mikroskopik ve makroskopik özellikleri üzerine faydalı etkileri mevcuttur. Kaplamaların özellikleri ara yüzeylerin miktarına göre ayarlanabilir. Ara yüzeyler kaplamanın özelliklerini ve kristal taneciklerin boyutunu etkiler, bu durum da mikro yapıyı ve dolayısıyla kaplamanın mekanik özelliklerini etkiler (Panjan, 2010).

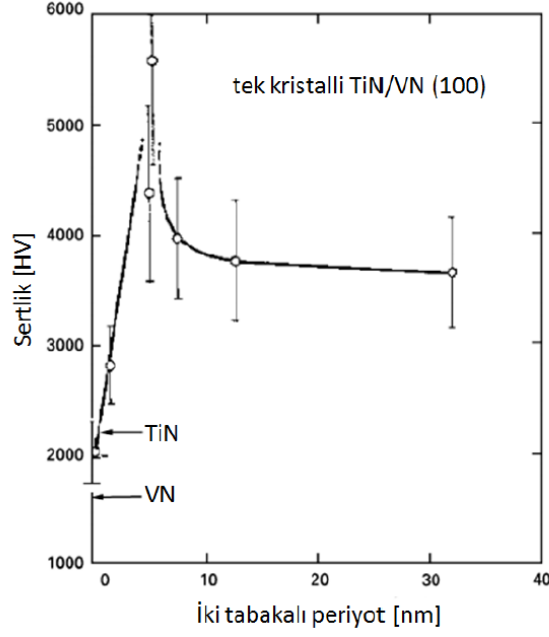
Çok tabakalı kaplamaların üçüncü bir avantajı ise mekanik özelliklere sahip birkaç ince tabakanın birbiri üzerine biriktirilerek gerilme konsantrasyonu ve çatlak oluşumu için şartların değiştirilebilmesidir. Holleck ve Schier (1995), çok tabakalı kaplamaların dayanırlılığını ve mukavemetini artıran farklı mekanizmalar belirlemişlerdir. Bu mekanizmalar Şeki 7’de gösterilmektedir. Çok tabakalı bir yüzey mekanik yüke maruz kaldığında, enerji yayılımı tabakaların içinde veya tabakalar arasındaki arayüzlerde tane sınırları oluşturabilir. Bu tane sınırlarında çatlak meydana gelebilir. Çatlağın oluşması durumunda, çatlağın enerjisi, çatlağın saptırılması veya dallanma ile azaltılmaktadır. Bu sebeple, yüksek miktardaki ara yüzeylerle beraber ince taneli mikro yapı, çatlak oluşumuna karşı dayanıklılığı ve direnci artırır (Panjan, 2010).



Şekil 7: Çok tabakalı yapıda mukavemet mekanizmalarının şematik gösterimi (Holleck ve Schier, 1995).

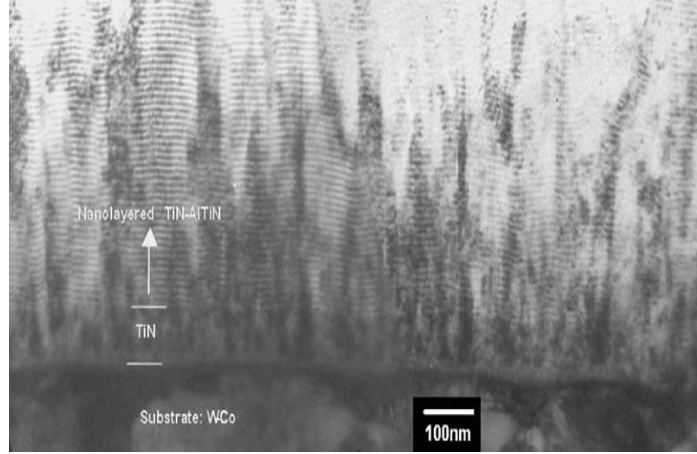
2.3.5 Nanotabakalı Sert Kaplamalar

Helmerson vd., (2006) yaptığı çalışmalarında nanotabakalı TiN/VN kaplamalarda büyük bir sertlik artışı gözlemlemiştir. Çalışmalarında, 50 GPa'yı geçen sertlik değeri elde etmişlerdir ve bu değer tek tabakalı TiN (~22 GPa) ve VN (~16 GPa) kaplamalarının sertliğinden çok daha yüksektir. Kaplamaların sertliği Şekil 8'de görüldüğü gibi tek tabakaların kalınlığı ile değişmiştir. Maksimum sertlik, 5-10 nm civarında iki tabakalı periyot kalınlığında elde edilmiştir. Ayrıca bu iki tabakalı kalınlık aralığında, çok tabakalı TiAlN kaplamalarda, tek tabakalı kaplamalarda görülen kolonsal yapıda değişimler meydana gelmiştir. Bu gelişmeden sonra, nanoyapılı kaplamalarda yeni bir alan ortaya çıkmış ve aynı sertlik artışı gösteren benzer nanotabakalı sistemler bulunmuştur.



Şekil 8: İki tabakalı periyodun fonksiyonu olarak nanotabakalı TiN/VN kaplamanın sertliğinin değişimi (Helmorsen vd., 1987).

Çok tabakalı kaplamalar ile nanotabakalı kaplamalar arasında açık bir ayrım bulunmamaktadır. Ancak, nanotabakalı kaplama yapılandırmalarında ortaya çıkan yüksek sertlik (süper sertlik) değerleri, bu kaplamaları çok tabakalı kaplamalardan ayırmaktadır. Nanotabakalı kaplamalarda sertlik, kaplamayı oluşturan malzemelerin ortalama sertlik değerine eşit değilken, çok tabakalı kaplamalarda sertlik, bu ortalama sertlik değerine eşittir. Süper sertlik değerleri genellikle 3-10 nm civarında değişmekte ve 10 nm'den daha büyük tabaka kalınlıklarına pek rastlanılmamaktadır. Ancak bu çalışmada, süper sertlik etkisine dayanarak yapılan kaplama ayrımı kullanılmamıştır. Kalınlığı 10 nm'den daha küçük olan kaplamalar nanotabakalı, daha büyük olanlar ise çok tabakalı kaplamalar olarak tanımlanmıştır. 100 nm altında ara yüzeyler, kaplamanın kalınlığı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu kalınlığın üzerinde ise kaplama özellikleri, çoğunlukla, kaplamayı oluşturan malzemelerin özellikleri tarafından belirlenmekte ve daha az oranda ara yüzeylerin miktarına bağlıdır. Nanotabakalı bir TiN/AlTiN yapısı Şekil 9'da gösterilmektedir (Okumiya Griepentrog, 1999).



Şekil 9: Nanotabakalı TiN/AlTiN kaplamanın TEM görüntüsü (Okumiya Griepentrog, 1999).

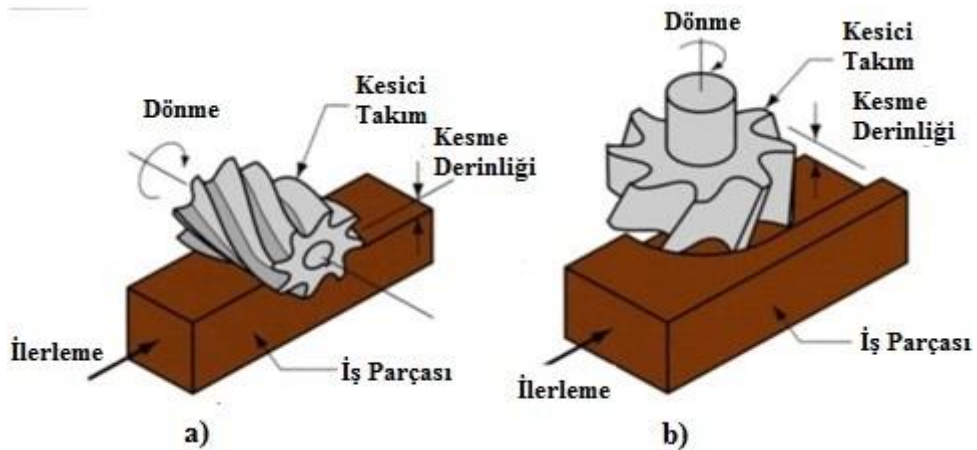
Nanotabakalı kaplamalardaki sertlik artışı ara yüzeyler sayesinde sağlanmaktadır. Bu artışı açıklayan farklı teoriler bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri tabaka ara yüzeyleri tarafından dislokasyonların engellenmesi (Koehler, 1970) ve Hall-Petch etkisidir (Anderson ve Li, 1995). Dislokasyonların engellenmesi, çok tabakalı kaplamanın tabakaları, farklı kayma modüllerine ve bu yüzden farklı dislokasyon çizgisi enerjilerine sahip olduğunda meydana gelmektedir. Bu durumda dislokasyonlar, daha düşük kayma modülüne ve dolayısıyla dislokasyon çizgisi enerjisine sahip tabakaların içerisinde kalmayı tercih etmektedirler. Daha büyük kayma modülüne sahip tabakanın içerisinde dislokasyonun hareket ettirilebilmesi için ilave bir gerilme gerekmektedir. Hall-Petch etkisinde ise, çok kristalli yığın metallerde azalan tane boyutu ile sertlik değerlerinde meydana gelen artışı açıklanmak için kullanılmıştır. Bu modelde, dislokasyonların tane sınırları boyunca hareket edemeyeceği ve bir tane üzerindeki dislokasyon çarpışmalarının bitişik bir tanede başka bir dislokasyon kaynağını başlatacağı varsayılmaktadır (Yashar ve Sproul, 1999). Hall-Petch ilişkisi, tane boyutunun tabaka periyoduna bağlı değişimi ile nanotabakalı kaplamalara uygulanmıştır (Anderson ve Li, 1995).

Kaplamanın yapısı, kaplamanın kırılma tokluğu üzerinde önemli rol oynamaktadır. Nano-çok tabakalı ya da süper örgülü kaplamaların mikro çentiklenmeye ve çatlak yayılmasına karşı tek tabakalı kaplamalardan daha iyi direnç gösterdiği bulunmuştur (PalDey ve Deevi, 2003). Ayrıca, bu tabakalar elementlerin yüzeye transferine yardımcı olmaktadır ve böylece kesici takım/talaş bölgesinde tribo-film oluşumu devam ettirilmektedir (Ning vd., 2008).

Nanotabakalı yapılarda, yarı kararlı kristal fazları güçlü arayüz enerjisi tarafından, epitaksiyel olarak kararlı hale getirilmektedir. Bu durum, birkaç nanometre kalınlığındaki tabakalarda, tabaka malzemesinin bir şablon gibi davranıp diğer malzemeyi aynı kristalografik yapıda büyümeye zorlaması ile oluşur. Örneğin, nanotabakalı TiN/AlN kaplamada epitaksiyel stabilizasyon görülmüştür. Termodinamik denge şartları altında, AlN hegzagonal vürtzit-tipi bir yapı oluşturmaya rağmen, TiN kübik NaCl tipi bir yapı oluşturmaktadır. AlN ise 2 nm'nin altındaki tabaka kalınlıklarında epitaksiyel olarak kararlı hale gelmektedir (Madan vd., 1996).

2.4 Frezeleme

Frezeleme, birden çok kesici takıma sahip takım tutucunun dönmesi ve iş parçasının doğrusal hareketi sonucunda iş parçasından talaş kaldırılması prensibine dayanmaktadır. Frezeleme, kesintili olarak yapılan bir talaşlı şekillendirme üretim yöntemi olup kesici uçların iş parçasına girip çıkmasıyla ilerler. Bu kesintili işlem kesici takım her bir devirde çarpma kuvvetine ve termal şoklara maruz bırakır. Takım malzemesi ve kesme geometrisi bu koşullar göz önüne alınarak tasarlanmalıdır. Frezeleme operasyonları çevresel (silindirik) frezeleme ve alın frezeleme olarak iki kategoriye ayrılabilir. Şekil 10'da frezeleme çeşitleri şematik olarak gösterilmiştir (Youssef ve El-Hoyf, 2008).



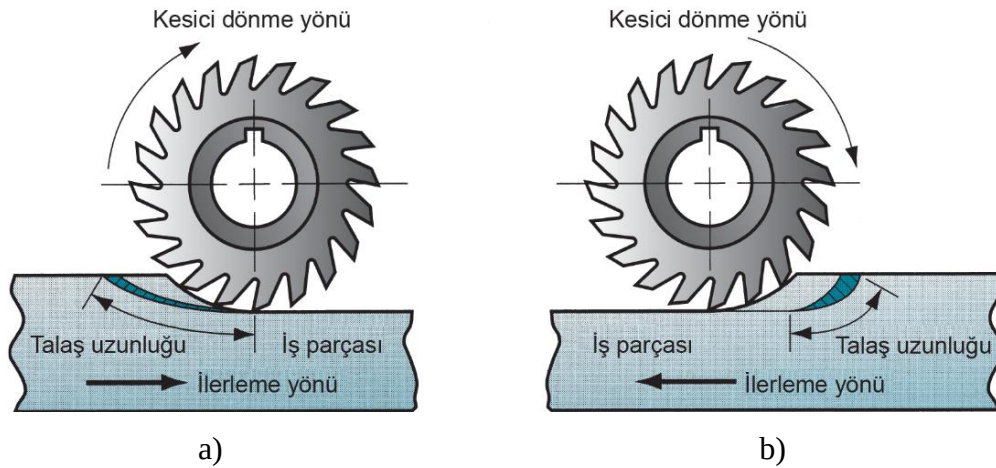
Şekil 10: Silindirik ve alın frezeleme: (a) Çevresel frezeleme (b) Alın frezeleme (Youssef ve El-Hoyf, 2008).

2.4.1 Çevresel Frezeleme

Çevresel frezelemede, kesici takımın dış yüzeyinde (çevresinde) bulunan dişler tarafından kesme işlemi yapılır ve işlem gören yüzey alanı kesme eksenine paraleldir (Şekil 10a). Çevresel frezeleme genelde yatay frezeleme tezgâhında gerçekleştirilir. Bu yüzden bu işleme bazen yatay frezeleme adını da verilir. Yüzey kalitesi ve talaş oluşum biçimi kesici takımların dönme yönünden etkilenmektedir. Buna bağlı olarak aynı yönlü ve zıt yönlü olmak üzere iki çeşit çevresel frezeleme yöntemi ortaya çıkmaktadır (Youssef ve ElHoyf, 2008).

2.4.1.1 Ters Yönlü Çevresel Frezeleme

Ters yönlü çevresel frezelemede kesicilerin dönme doğrultusu iş parçasının ilerleme yönünün tersinedir (Şekil 11a). Kesici uçlar iş parçasından farklı açılardan talaş kaldırırlar. Bu da talaşların kalınlığının artarak büyümesi anlamına gelir. Talaş kaldırma sırasındaki operasyon döngüsü ilk başta kayma işlemi, daha sonrasında kırma işlemi ve ardından kesme işlemiyle tamamlanır. Ters yönlü çevresel frezelemenin negatif yanı ise bazı metallerde işlenmiş yüzeyde gerinim sertleşmesi oluşması olarak değerlendirilebilir (Youssef ve ElHoyf, 2008).



Şekil 11: Ters yönlü çevresel frezeleme (a) ve eş yönlü çevresel frezelemenin (b) şematik gösterimi (Youssef ve El-Hoyf, 2008).

2.4.1.2 Aynı (Eş) Yönlü Çevresel Frezeleme

Aynı yönlü çevresel frezelemede kesici takımların dönme yönü ile iş parçasının ilerleme yönü aynıdır (Şekil 11b). İlerleme ve dönme yönünün aynı olması sebebi ile talaş kaldırma sırasında oluşan bileşke kuvvet değeri az olur ve böylece tezgâhta harcanan enerjinin az olması sağlanmıştır. Bu operasyonda kesici takım iş parçasına girdiği ilk anda talaş kalınlığı maksimum değerinde olup talaş oluşumu sırasında talaş kalınlığı ve kesme kuvveti azalır. Eş yönlü frezeleme işlemi, kesici takımlar gerekli sertliğe sahip olmadığı takdirde yapılmamalıdır. Aksi halde bu koşullar altında kesiciler iş parçası üzerinde ilerlerken zarar görebilir. Bu işlemin en önemli avantajları şöyle sıralanabilir: Kesme kuvveti eş yönlü olduğundan kesici takım onarım mekanizması daha kolay ve ucuzdur, sıkıca tutulamayan düz iş parçaları bu yöntemle şekillendirilebilir, yüksek talaş açısına sahip kesiciler harcanan enerjiyi düşürmek için kullanılabilir ve gelişmiş yüzey değerleri elde edilebilir (Youssef ve El-Hoyf, 2008).

2.4.2 Alın Frezeleme

Alın frezelemede, işlem gören yüzey, kesici eksenine dik açıda bulunmaktadır (Şekil 10b). Büyük çaplı kesiciler kullanıldığında, kesici uçlar yaklaşık 1-3° açılarda eğerek bir boşluk sağlanabilir. Bu işlem sayesinde daha iyi bir yüzey pürüzlülüğü elde edilebilir ve takımların körleşmesi engellenebilir. Bu operasyon genel olarak düşey freze tezgâhlarında gerçekleştirilir (Youssef ve El-Hoyf, 2008).

2.4.3 Frezelemede Temel Parametreler

Kesme Hızı: Kesme hızı, kesici ucun iş parçası üzerindeki bir dakikada metre cinsinden kaldırdığı talaşın uzunluğudur. Kesici takımın cinsi, talaş kaldırma yöntemi, iş parçasının malzemesi ve tezgâh ve iş parçasının sertlik değerleri göz önünde bulundurularak seçilir (Youssef ve El-Hoyf, 2008).

İlerleme Hareketi: İlerleme (f), kesici takımın iş parçası üzerinde doğrusal olarak bir dakikada mm cinsinden kat ettiği mesafedir. Bu, diş başına ilerleme (f_z) ile kesici dişlerin sayısının (Z) çarpıma eşittir. Freze tezgâhlarında kullanılan kesici takımlar genellikle çok dişli takımlar olduğundan ilerleme değeri verilirken tek bir uç için verilir. Verilen bu

ilerleme değeri kesici takım üzerinde bulunan diş sayısı ile çarpılarak bir devirde alınan ilerleme bulunur. Daha sonra ise bu değer dakikadaki devir sayısı ile çarpılarak bir dakikada alınan yol yapılan mm cinsinden ilerleme bulunur (Dursun, 2007).

Kesme Derinliği ve Kesme Genişliği: Kesici takımın iş parçasında oluşturduğu derinliğe kesme derinliği kapladığı genişliğe ise kesme genişliği adı verilir. Yatay frezeleme işlemlerinde kesme genişliği göz önüne alınırken, dikey frezeleme işlemlerinde kesme derinliği göz önüne alınır (Dursun, 2007).

Çalışma Alanı: İş parçasının bulunduğu düzlemde ilerleme doğrultusuna dik olan alandır (Dursun, 2007).

2.5 İşlenebilirlik ve İşlenebilirliği Etkileyen Faktörler

2.5.1 İşlenebilirlik

İşlenebilirlik kavramı belli bir malzeme ya da malzeme grubunun talaşlı işlenebilirlik yeteneğini ifade eder. Bazı malzemeler kolay işlenebilirken, bazı malzemelerin ise işlenebilirliği oldukça zordur. İş parçasının fiziksel ve mekanik özellikleri, işlenebilirliği etkileyen en önemli faktörlerdir. Bu faktörlerin başında, kimyasal bileşim, mikroyapı, mekanik özellikler (sertlik, çekme dayanımı, vb.) ve fiziksel özellikler gelir. Ancak işlenebilirliği sadece malzeme özelliklerini göz önüne alarak değerlendirmek doğru bir yaklaşım değildir. İşlenebilirlik, iş parçası, takım malzemesi, tezgâh, kesme sıvısı ve kesme koşulları gibi durumları da içeren geniş bir kavramdır (Stephenson ve Agapiou, 2006). İşlenebilirlik terimi genellikle karşılaştırma ya da görecelendirme amacıyla kullanılır.

2.5.2 İşlenebilirliği Etkileyen Faktörler

İşlenebilirliği belirlenmesinde kullanılan faktörler şu şekildedir:

Takım ömrü veya Takım Aşınma Oranı: Bu faktörler işlenebilirliği belirleyen temel özellikler olarak değerlendirilmektedir. Hızlı takım aşınması olmadan işlenebilen

malzemeler genellikle iyi işlenebilir malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Özellikle sert metal işlemede, erken takım aşınması probleminden dolayı, takım ömrü önemli bir işlenebilirlik göstergesidir. Eğer, belirli kesme koşulları altında takım aşınmaları azalıyorsa o malzemenin işlenebilirliği artıyor demektir. Takım aşınması, işlenen iş parçasının maliyetini ve kalitesini direkt olarak etkiler. Örneğin, abraziv özellikli malzemeler daha hızlı takım aşınmalarına ve dolayısıyla daha yüksek işleme maliyetlerine neden olmaktadır. Kesici takım geometrisi, tezgâh durumu, kesici takımın montajı, kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme derinliği gibi değişkenlere bağlı olan ve takım ömrünü işlenebilirlik göstergesi olarak değerlendirmek problemlere neden olabilmektedir (Stephenson ve Agapiou, 2006).

Takım Kuvvetleri ve Güç Tüketimi: Kesici takımın iş parçası malzemesi içerisinde kolay hareket etmesi, kesme kuvvetleri ve dolayısıyla güç tüketiminin azalması anlamına gelmektedir. Bu durumda işlenebilirlik artmaktadır. Kesme kuvvetlerini ve güç tüketimini azaltıp, işlenebilirliği artırmak için, kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi özelliklerin dikkate alınıp, iyileştirilmesi gerekir (Stephenson ve Agapiou, 2006).

Yüzey Pürüzlülüğü: Bir kesme işleminde yüzey kalitesi önemli bir faktördür. Takım üzerinde yıgıntı oluşarak yüzeyin pürüzlülüğünün artması, işlenebilirliği olumsuz etkilemektedir. Ancak pürüzlülük her zaman işlenebilirliğin belirlenmesinde önemli rol oynamaz. Kullanılan malzemenin cinsine göre, yüzey pürüzlülüğünün işlenebilirliğe etkisi farklı olmaktadır (Stephenson ve Agapiou, 2006).

Talaş Formu: Talaş formuna göre işlenebilirlik değerlendirmesi yapılabilmektedir. Bu değerlendirmeye göre, uzun, kopmayan talaş veren malzemelerin işlenebilirliğinin düşük olduğu, ancak kısa talaş veren malzemelerin ise uygun kesme koşullarında işlenebilirliğinin yüksek olduğu söylenebilir. Talaş oluşumu, kesme parametreleri değiştirilerek ve uygun talaş kırıcılar kullanılarak istenilen duruma getirilip, işlenebilirlik derecesi artırılabilir (Stephenson ve Agapiou, 2006).

2.5.3 Ti6Al4V Alaşımının İşlenebilirliği

Ti6Al4V alaşımı, $\alpha+\beta$ fazı alaşımları grubunda en çok bilinen alaşım olmakla beraber, genellikle havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılır. Bu alaşım grubunun en önemli

özelliği yüksek sıcaklıklarda ısı direncini ve mekanik özelliklerini koruyabilmeleridir Ti6Al4V alaşımı yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruyabildiği halde, işlenebilirlik söz konusu olduğunda bu özelliği dezavantaj oluşturmaktadır (Stephenson ve Agapiou, 2006).

Kesici takım, kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği ve kesme sıvısının kullanımı Ti6Al4V alaşımının işlenebilirliğine etki eden kesme parametreleridir. Ti6Al4V alaşımı işlenirken, sürekli/testere dişli talaş oluşumuna, düşük elastisite modülüne sahip olan rijit bir sisteme ve aşınma direnci yüksek kesici takımlara ihtiyaç vardır. Maliyet ve kalite açısından K sınıfı tungsten karbür takımlar kullanılmalıdır. Kesme hızı takım ömrünü negatif yönde en çok etkileyen parametre olarak gerekli ölçütlerde kısıtlanmalıdır. Kesme hızından sonra Ti6Al4V alaşımının işlenmesini en çok etkileyen faktör kesme derinliğidir ve takım aşınmasını artırdığı için küçük değerlerde olmalıdır. İşleme sırasında karşılaşılan en büyük sorun yüksek sıcaklıklar olduğu için, bu sorunu engellemek amacıyla kesme sıvısı kullanılmalı ve bu sıvı tam olarak kesme bölgesinde uygulanmalıdır (Stephenson ve Agapiou, 2006).

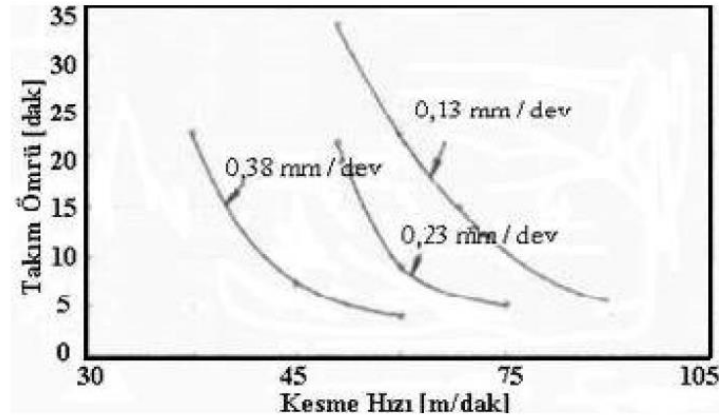
2.5.3.1 Kesici Takım

Titanyum iş parçasının işlenmesi esnasında, kesici takımlar, titanyum alaşımlarının sahip olduğu çeşitli karakteristik özelliklerden olumsuz etkilenmektedirler. Titanyum ve alaşımlarının mukavemetinin yüksek sıcaklıklarda koruması, kesici takım üzerinde yüksek kuvvet ve ısı oluşmasına neden olur. Takımların, meydana gelen bu yüksek ısıya direnç gösterebilmesi için “kızıl sertlik” özelliklerinin yüksek olması gerekir. Titanyumdaki talaş/takım mesafesi dardır. Bu durum kesme kuvvetinin ve sıcaklığın kesici takıma yoğunlaşmasına neden olur. Kesici takımın daha rahat talaş kaldırabilmesi için uç keskinliği yüksek olmalıdır. Titanyum alaşımlarının bir diğer karakteristik özelliği olan ısı iletkenliğinin düşük olması, ısının sıkışıp yükselmesine neden olur. Bu yüzden diğer malzemelerde kullanılan uçlara göre ısı iletkenlik değerleri yüksek olmalıdır. Titanyum alaşımlarının kimyasal reaktifliğinin fazla olması kesici takım üzerinde krater aşınması gibi kimyasal tabakalı aşınmalara neden olur. Kesici takımların bu aşınmalara direnç gösterebilmesi için, difüzyon ve abrazif tip aşınmalara dayanımı ve kimyasal kararlılık özellikleri iyi olmalıdır. Periyodik talaş oluşumu ve titanyum alaşımının düşük

elastisitesinden kaynaklı değişken kuvvetler, takım üzerinde vibrasyon ve tırlama oluşmasına neden olur. Kuvvetlerin dar bir alana yayılması, tırlama olasılığı ve kraterlerle olan ucun zayıflaması durumlarına karşı, özellikle uç kısımlarda takım tokluğunun yüksek olması gerekir (Riberio vd., 2003).

2.5.3.2 Kesme Hızı

Titanyum alaşımının işlenmesinde kesme hızı önemli bir rol oynar. Titanyum alaşımının, işleme maliyetlerinin telafi edilmesi için mümkün olduğunca yüksek hızda işlenmelidir. Buna rağmen, kesme hızının artması ile sıcaklık ve bu artış sürekli/testere dişli talaşın oluşmasına sebep olur. Bu durumda, kesici takım mukavemetini yitirirken, titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri sayesinde mukavemetini koruması yüzey kalitesinin düşmesine, mikro yapının bozulmasına ve sertliğin artmasına neden olur. Kesme hızının artırılması ile talaş oluşumu büyümekte ve takım aşınması artmaktadır. Ti6Al4V alaşımının karbür takımlarla işlenmesi sırasında, kesme hızı arttıkça takım ömrünün azaldığı Şekil 12’de görölmektedir (Riberio vd., 2003).



Şekil 12: Ti6Al4V alaşımı için kesme hızı-takım ömrü-ilerleme grafiği (İşler, 1999).

2.5.3.3 İlerleme

Talaşlı imalatla ilerlemenin genellikle tek sınırlayıcısı yüzey pürüzlülüğü iken, titanyum alaşımları işlenirken ilerlemenin takım ömrünü daha fazla etkilediği gözlemlenmiştir. Bu durum birçok sebebe bağlı olarak gerçekteşmektedir. Titanyum alaşımlarının ısı iletkenliğinin düşük olması ve yüksek sıcaklıkların ortaya çıkmasına bağlı olarak aşınma

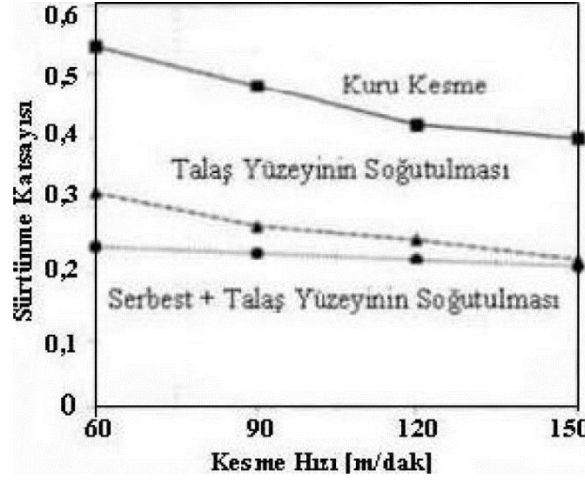
genellikle yüksek sıcaklıkta olmaktadır. Buna bağlı olarak, ilerleme sıcaklıkla beraber arttığı için ve ilerlemenin karekökü takım/talaş kesitiyle doğru orantılı olduğu için aşınma mekanizmaları etkinliklerini artırmaktadır. Bir diğer sebep ise, takım/talaş temas alanının çok dar olmasından dolayı ilerleme kuvvet artışına daha etkili olmaktadır (Riberio vd., 2003).

2.5.3.4 Kesme Derinliği

Titanyum alaşımlarının işleminde, kesme derinliği, kesme hızından sonra en önemli parametre olarak değerlendirilmektedir. Kesme derinliğinin artması talaş hacmi artmasına neden olur. Bu durum da üç ayrı parametreyi etkilemektedir. Artan talaş hacmi hem gerilmelerin, hem sürtünmenin hem de sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. Titanyumun işlenmesinde takım ömrünü en çok etkileyen faktör olan ısının, kesme derinliğinin artışıyla beraber çok yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu durum da titanyum alaşımlarının işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir (Riberio vd., 2003).

2.5.3.5 Kesme Sıvısının Kullanımı

Titanyum alaşımlarının işlenmesinde en önemli sorunların yüksek sıcaklıklara bağlı olarak gerçekteşen aşınma mekanizmaları olduğu göz önüne alındığında, kesme sıvılarının kullanılmasının gerekli olduğu rahatça söylenebilmektedir. Düşük kesme hızlarında bor yağı kullanımı yeterli olurken, yüksek kesme hızlarında ve delme işlemlerinde, korozyon riskine rağmen klor içeren kesme yağlarının kullanılması gerekmektedir. Geleneksel kesme sıvıları soğutma özelliklerinin yanı sıra yağlama işlevi de görürken, kriyojenikte kullanılan sıvı azot gibi sıvılar çok daha düşük kesme sıcaklıkları sağlarlar. Ayrıca, Şekil 13’de ki grafikte de görüldüğü gibi, geleneksel kesme sıvıları gibi olmasa da sıvı azotun yüksek basınçla talaş/takım alanına nüfuz etmesi sayesinde sürtünme etkileri azalır. Sıvı azot bu özelliğiyle, sıcaklığın düşmesini ve takım sertliğinin korunmasını sağlar. Takım sertliğinin korunması ile beraber takım/talaş arasındaki yapışma eğilimi kısmen yok olur, sürtünme katsayısı düşer ve dolayısıyla yağlama etkisi de oluşmuştur (İşler, 1999).

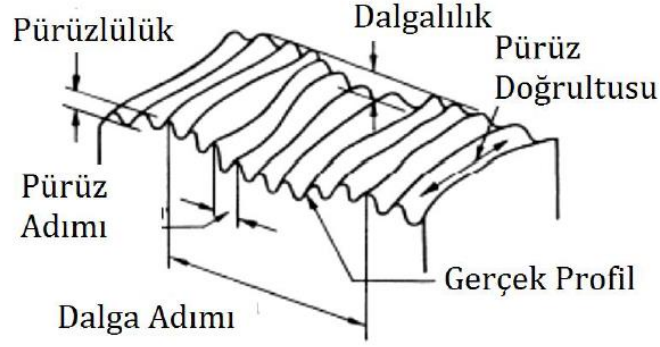


Şekil 13: Sıvı azotun sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi (İşler, 1999).

2.6 Yüzey Pürüzlülüğü

Talaşlı imalatta iş parçası yüzey pürüzlülüğü, yüzey hassasiyetlerinden en önemli olanıdır. Talaşlı imalatta üretilen parçalar incelendiği zaman yüzey her ne kadar düz gibi görünse de gerçekte parça yüzeyindeki sürtünme alanı oldukça fazla olmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörlerin başında kesici takımın uç yarıçapı, ilerleme, kesici takımın kenarının keskinliği, işleme sırasında iş parçasında çizilmeler meydana gelmesi, işleme sırasında yığıntı talaşların iş parçasının yüzeyinde yapışması gibi faktörlerin meydana gelmesiyle oluşmuştur (Oktay, 2011).

Talaş kaldırma sırasında oluşan yüzeylerde yüzey dokusu, üç boyutlu yüzey topografisi şeklinde nominal yüzeyden sapmalar olarak tanımlanır. Dalgalılık, yüzeyin geometrik şeklini meydana getirirken, pürüzlülük ise işlenecek yüzeyin kalitesini tayin eder (Şekil 14). Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirme kriteri, yüzeye dik olan bir kesitte belirli bir numune uzunluğu boyunca, belirli bir referans profiline ve profil ortalama çizgisine göre tayin edilir. Yüzey pürüzlülük sonucunda ortalama çizgisinin yeri, çizgilerin üstünde ve altında kalan alanların toplamı birbirine eşit olarak belirlenir (Akkurt, 2000).



Şekil 14: Yüzey kalitesini tayin eden faktörler (Oktay, 2011).

2.6.1 Yüzey Pürüzlülüğünün Önemli Olduğu Durumlar

Yüzey pürüzlülüğü; sürtünmeli yataklar, plastik enjeksiyon kalıp yüzeyleri, sızdırmazlık istenen yüzeyler, boyanmış ve kaplanmış yüzeyler, yuvarlanmalı yataklar ve bunun gibi birçok uygulamada oldukça önemli bir parametredir (Tekaüt, 2008).

2.6.2 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçme Yöntemleri

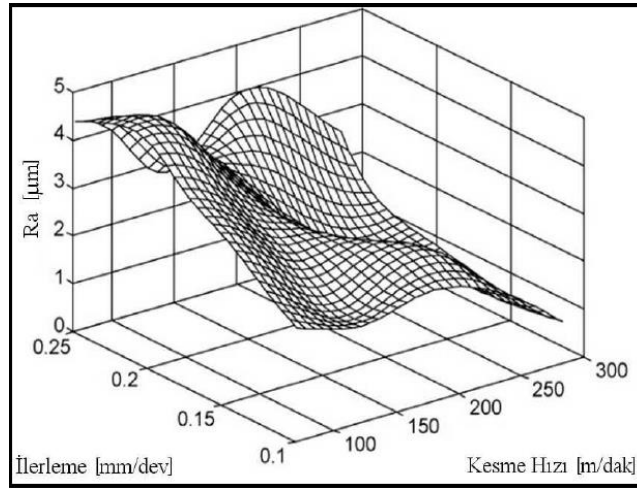
Yüzey pürüzlülüğü değerleri mekanik-elektronik pürüzlülük ölçme cihazı vasıtasıyla ölçülmektedir. Bu cihaz küçük çaplı elmas bir iğne uca sahiptir ve bu uç yüzey çizgileri arasında ilerleyerek cihazın pürüzlülük değerlerini okuyup çıktı olarak vermesini sağlar. Bu tarz elektronik devreli cihazlar kesme genişliği üzerinden ortalama değerler olarak yüzey pürüzlülük değerini ortaya koyar. Bu cihazlardan yüzeyin fiziksel karakteristik özellikleri ile ilgili veri alınamaz (Çiftçi, 2005).

2.6.3 Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörler

Yüzey pürüzlülüğü, şekillendirme operasyonlarının sebep olduğu yüzey hasarları ve düzensizliklerinin bir bütünü olarak tanımlanır. Bu hasar ve düzensizlik mekanizmalarını aşağıda sıralanan faktörler etkiler:

- Kesici takımın ya da iş parçasının hatalı ilerlemesi,
- Kesici uçların aşınması,
- Operasyon esnasında meydana gelen titreşimler,
- Talaş oluşumu ve talaşın kopması,
- Yüzeyde oluşan kimyasal ve fiziksel değişiklikler,
- Kesici uç yarıçapı,
- Kesme hızı,
- Talaş derinliği,
- Kesici takım geometrisi,
- Kesici ucun üzerine talaşın yapışması.

Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörler arasında kesme hızı ve ilerleme miktarı özellikle dikkat çekmektedir. Şekil 15’de bu iki faktörün yüzey pürüzlülüğüne etkisi gösterilmektedir (Tekauit, 2008).



Şekil 15: Kesme hızı ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Topçu, 2009).

2.7 Takım Aşınması

Aşınma sonucunda kesici takım yüzeyi üzerinde geometrik değişiklikler meydana geldiğinden dolayı takım aşınması yüzeyin kalitesi üzerinde büyük etkiye sahiptir. Bu nedenle, takım aşınmasına etki eden parametrelerin ne olduğunun ve nelere bağlı olduğunun tespit edilmesi gerekmektedir. Bu parametrelerden bazıları, takım malzemesi, iş

parçası malzemesi, kesme hızı, ilerleme oranı, talaş derinliği, talaş geometrisi, takım geometrisi ve soğutma sıvısıdır. Bunlarda yapılan değişiklikler ile birlikte aşınma mekanizmaları ve aşınma tiplerinde değişiklikler gözlenmektedir (Özcan, 2001).

2.7.1 Aşınma Mekanizmaları

Kesici takımların ömrünü tamamlamasında etkili olan beş adet aşınma mekanizması mevcuttur. Bu mekanizmalar; abraziv aşınma, difüzyon aşınma, oksidasyon aşınma, yorulma ile aşınma ve adeziv aşınma mekanizmalarıdır (Özcan, 2001).

2.7.1.1 Abraziv Aşınma

Yüzeylerden birinin diğerinden çok daha sert olduğu temaslarda veya sert parçacıkların temas bölgesi içerisinde yer aldığı durumlarda meydana gelmektedir. Daha sert olan yüzeyin çıkıntılarının yumuşak olan yüzey üzerine bastırması sonucunda, yumuşak malzeme sert malzeme etrafında plastik olarak akmaktadır. Sert malzeme teğetsel olarak hareket ettiğinde, yumuşak malzemenin aşınması ve taşınması sonucunda yüzeyde yivler ya da çizikler oluşmaktadır (Holmberg ve Matthews, 2009). Sert malzemelerin sıkıştırılması ile elde edilen takım malzemeleri sayesinde takımların abraziv aşınma direnci artırılmaktadır (Çakır, 2006).

2.7.1.2 Difüzyon Aşınması

Yüksek kesme sıcaklıklarında kesici takım ve iş parçası malzemesinin elementlerinin karşılıklı olarak birbirinin yapısına difüzyonu sonucunda meydana gelmektedir. Bu aşınma türünde iş parçasının ve kesici takımın kimyasal etkileşimi etkili olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda difüzyon aşınması meydana gelmekte ve kesici takımın talaş yüzeyi üzerinde bir krater oluşmaktadır (Şeker, 1997).

2.7.1.3 Oksidasyon Aşınması

Kesici takım veya iş parçası malzemesindeki atomların, havaya maruz kaldığı temas sınırında yeni moleküller oluşturması sonucunda meydana gelmektedir. Kesici takımdaki

tungsten ve kobalt, iş parçası yüzeyi kesici takım serbest yüzeyine yakın oksitlenmektedir. Bu durum, kesici takım üzerinde çentikli aşınmaya yol açmaktadır (Şeker, 1997).

2.7.1.4 Yorulma ile Aşınma

Sıcaklığın ve takıma etkiyen kesme kuvvetlerinin değişmesi sonucunda meydana gelmiştir. Sıcaklık değerlerinde olan değişimler ve uygulanan yüklerin artıp azalması, kesici uçlarda kırılmalara ve çatlaklara sebebiyet verir. Bu durum, sert ve dayanıklı iş parçası malzemelerinin çok yüksek ilerleme oranlarında işlenmesi veya takım malzemesinin yeterince sert olmaması durumunda plastik deformasyon oluşumu şeklinde görülmektedir (Şeker, 1997).

2.7.1.5 Adeziv Aşınma

Düşük işleme sıcaklıklarında meydana gelir. Çelik, alüminyum ve dökme demir gibi malzemelerin işlenmesinde sıkça adeziv aşınma görülür. Bu aşınmada kesici uç ile talaş arasında talaş yapışması olur. Yığılan bu talaşlar sertleşerek zamanla takımın bir parçası haline gelirler. Oluşan bu sert tabaka kesici uçların kırılmasına veya zarar görmesine sebep olabilir (Özcan, 2001).

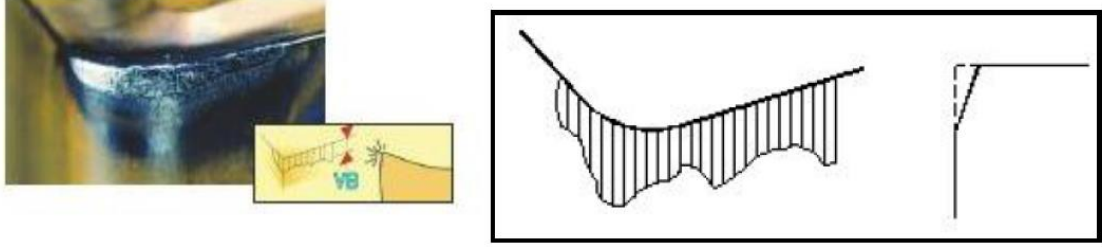
2.7.2 Takım Aşınma Tipleri

Takım aşınmaları kesici takımın maruz kaldığı fiziksel ve kimyasal aşınma mekanizmaları ile bağlantılı olarak sınıflandırılır. Takım aşınma tipleri; serbest yüzey aşınması, krater aşınması, çentik aşınması, ısı ve mekanik çatlaklar, yığılma ve sıvanma, plastik deformasyon, kırılma ve kenar çektiklenmesi olmak üzere sekiz grupta incelenirler (Özcan, 2001).

2.7.2.1 Serbest Yüzey Aşınması

Serbest yüzey aşınması talaşlı şekillendirme işlemlerinde sıklıkla meydana gelen bir aşınma türüdür. İş parçası yüzeyinde bulunan sert kısımların kesici takım yüzeyine sürtünmesiyle oluşur. Sürtünme kesici takımların yan kenarlarının olumsuz etkilenmesine sebep olur ve bu olumsuz etkinin büyüklüğü ile serbest yüzey aşınması meydana gelir. Aşınma değeri belli bir kritik değere ulaştığında kesici takımlar işlevlerini kaybederler ve

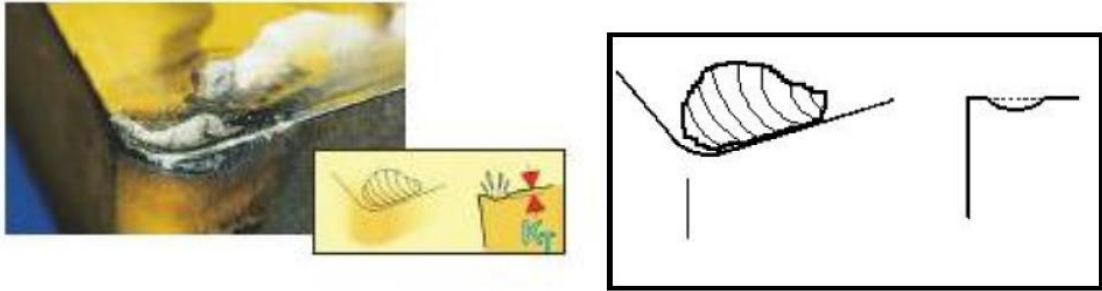
kesme sırasında istenmeyen titreşimler oluşur. Bu da iş parçasının yüzey kalitesini olumsuz etkiler. Serbest yüzey aşınması Şekil 16’da gösterilmiştir (Sandvik, 2015).



Şekil 16: Serbest yüzey aşınması (Sandvik, 2015).

2.7.2.2 Krater Aşınması

Krater aşınması kesici takım üzerinde iki sebepten dolayı meydana gelmektedir. İlk sebep, yüksek sıcaklık değerlerinde birbiri ile kimyasal etkileşimi güçlü olan takım ve iş parçasının takımın talaş yüzeyinde difüzyon oluşturmalarıdır. Diğer neden ise, yüksek sertlik, kızıl sertlik ve malzemeler arasındaki minimum afinite krater aşınması eğilimini en aza indirir. Bu iki durumun oluşması sonucunda takım geometrisi bozulur ve kesici uç hasar görür. Şekil 17’de krater aşınması şematik olarak gösterilmiştir (Sandvik, 2015).

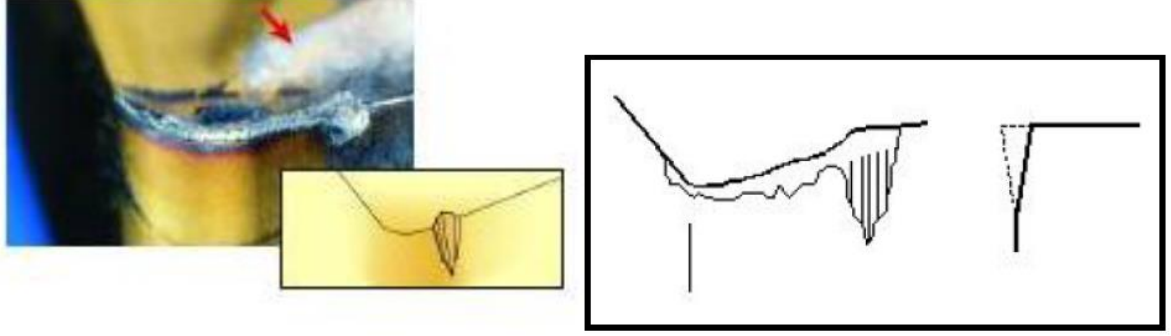


Şekil 17: Krater aşınması (Sandvik, 2015).

2.7.2.3 Çentikli Aşınması

Adeziv aşınma mekanizmasının sebep olduğu bir aşınma tipidir. Oksidasyon aşınma mekanizması ile büyüme gösterir. Oluşan aşınmanı şekli kesici takıma çentik atılmış gibi gözüktüğünden bu aşınma tipine çentik aşınması denir. Bu aşınma tipi serbest yüzeyin yardımcı kenarı üzerinde, kesici kenar ile iş parçası malzemesinin ayrıldığı noktada oluşmaktadır. Çentik aşınması özellikle titanyum gibi işlenmesi zor ve sert olan iş

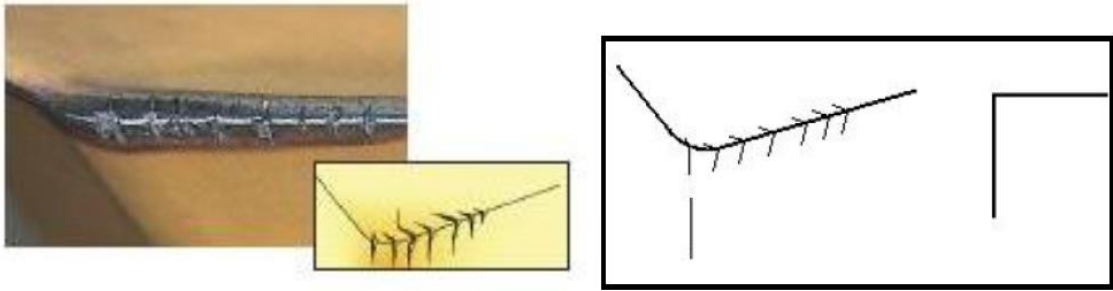
parçalarının talaşlı şekillendirilmesi sırasında görülür. Hava, yüksek sıcaklığa sahip olan bu kesme bölgesine ulaşmakta ve bu yüzden adezyon/oksidasyon beklenebilmektedir. Şekil 18’de çentik aşınması şematik olarak gösterilmiştir (Sandvik, 2015).



Şekil 18: Çentik aşınması (Sandvik, 2015).

2.7.2.4 Isıl ve Mekanik Çatlaklar

Isıl ve mekanik çatlaklar yorulma ile aşınma mekanizması etkisiyle olur. Bu tarz çatlaklar aralıklı olarak yapılan talaş kaldırma işlemlerinde görülür. Takım üzerindeki sıcaklık değişiklikleri kesme kenarına dik, uygulanan farklı yük değerleri ise kesme kenarına paralel çatlaklar oluşmasına sebep olurlar. Şekil 19’da ısıl çatlakların oluşumu gösterilmiştir (Sandvik, 2015).

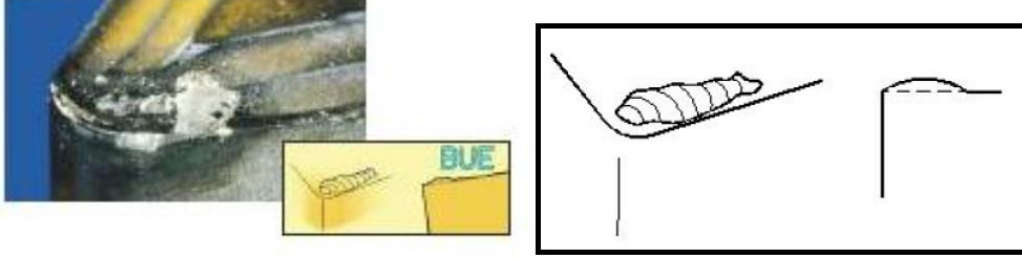


Şekil 19: Isıl çatlaklar (Sandvik, 2015).

2.7.2.5 Yığıntı Kenar Oluşumu (BUE)

Yığılma ve sıvanma genellikle yumuşak malzemelerin düşük kesme hızlarında işlenmesi sonucunda, işlenen malzemedan kopan talaşların kesme kenarına yapışması ve birikmesi

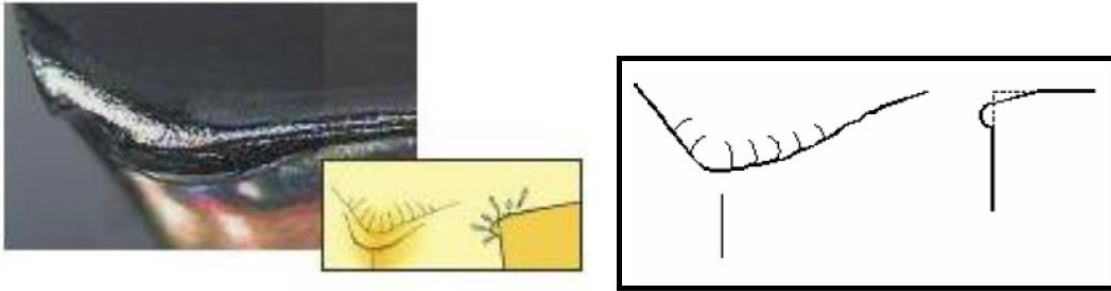
biçimde oluşur. Yığılma ve sıvanma, kesme derinliğinde sapmalara yol açarak yüzey kalitesini olumsuz etkiler. Takım yüzeyinden parçacık kopmasına neden olduğu için istenmeyen bir durumdur ve önlenmesi gerekmektedir. Şekil 20’de yığılma ve sıvanma mekanizması gösterilmiştir (Sandvik, 2015).



Şekil 20: Yığıntı Kenar Oluşumu (BUE) (Sandvik, 2015).

2.7.2.6 Plastik Deformasyon

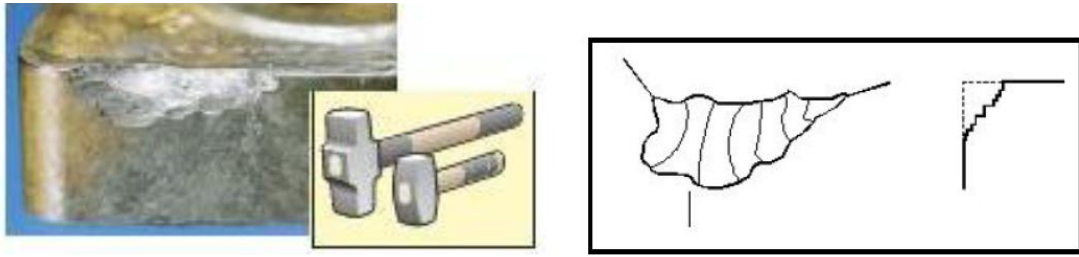
Plastik deformasyon, kesici kenar üzerindeki yüksek basınç ve yüksek sıcaklık kombinasyonunun bir sonucu olarak ortaya çıkar. Yüksek hızlar ve yüksek ilerlemeler; sert iş parçası malzemesi, sıcak ve basınç anlamı taşır. Takım malzemesinin bunlara karşı koyabilmesi ve plastik olarak şekil değiştirmemesi için yüksek sıcaklık sertliği kritiktir. Kesici kenarda bir şişmenin oluşması daha yüksek sıcaklıkların oluşmasına, geometrinin deformasyonuna, talaş akışının değişmesine sebep olacak ve kritik bir noktaya ulaşıncaya kadar etkisi devam edecektir (Şekil 21) (Sandvik, 2015).



Şekil 21: Plastik deformasyon (Sandvik, 2015).

2.7.2.7 Kırılma

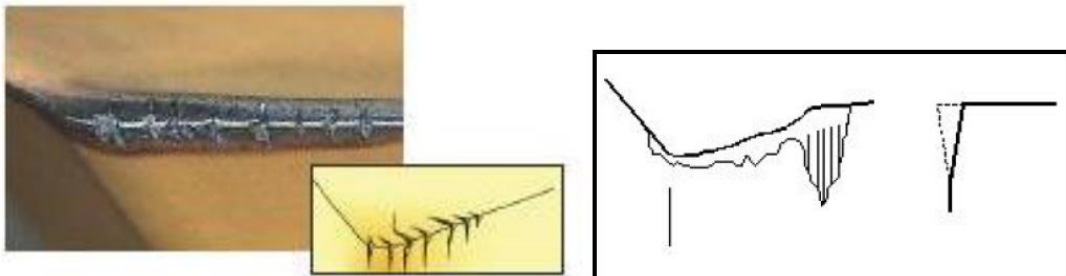
Sertliği fazla ve sünekliği az olan seramik benzeri kesici takımlarda, aşınma ve hasar mekanizmalarının neden olduğu kırılmalar meydana gelmektedir. Takım kırılması hasarını önlemek ve takım ömrünü yükseltmek için, kesme kuvvetlerinin azaltılması sağlam ve daha rijit takım tertibatlarının kullanılması ve kırılma tokluğu artırılmış takımların kullanılması gerekmektedir. Şekil 22’de kırılma mekanizması gösterilmiştir (Sandvik, 2015).



Şekil 22: Kırılma (Sandvik, 2015).

2.7.2.8 Kenar Çentiklenmesi

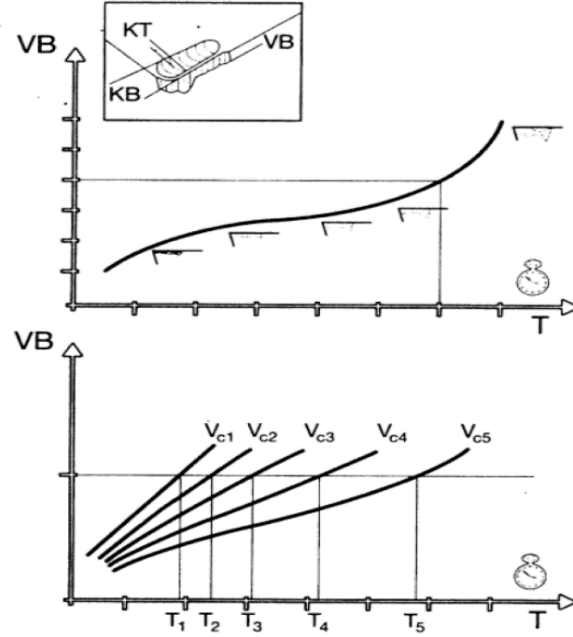
Yüksek kesme kuvvetleri altında kalan seramik ve metal matrisli kompozit takımlarda görülür. İşleme sırasında oluşan titreşimler, kesici takımın kenarlarında çentik oluşumuna sebep olur. Bu oluşum kenar çentiklenmesi adını alır. Kenar çentiklenmesi oluşan yüzeyler kırılabilir ve iş parçasının yüzey kalitesinde azalmalar meydana gelebilir. Şekil 23’de kenar çentiklenmesi gösterilmiştir (Sandvik, 2015).



Şekil 23: Kenar çentiklenmesi (Sandvik, 2015).

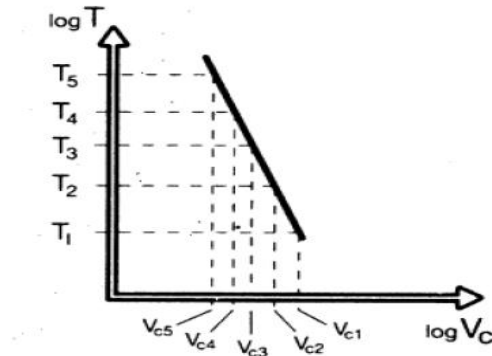
2.7.3 Takım Aşınmasının Kontrolü

Kesici kenarın ne zaman aşındığının tespit edilmesi çok önemli bir durumdur. Aşınma(VB)/zaman(T) diyagramları takım aşınmasının kontrolü için önemli veriler içermektedir. Aşınma eğrisi başlangıçta orta hızda seyrederek, daha sonrasında ani bir artış gösterir. Kesme hızlarına karşılık gelen belirli aşınma değerlerine göre eğri şeklini almaktadır. Aşınma/zaman diyagramı Şekil 24’de gösterilmiştir (Çakır, 1999).



Şekil 24: Aşınma gelişimi ve ömür (Çakır, 1999).

İşleme zamanı (T) belirli bir aşınma miktarı için kesici kenarın ömrüdür. İşleme zamanı ve aşınma miktarı arasında bir bağıntı belirlenmesi için logaritmik bir zaman(T)-kesme hızı(V_c) eğrisi çizilir (Şekil 25). Bu eğrinin yardımıyla takım aşınması kontrolü sağlanır.



Şekil 25: Ömür-kesme hızı bağıntısı (Çakır, 1999).

2.7.4 Takım Ömrü

Kesici kenarın yapması gereken işlemleri (istenen yüzey kalitesini ve boyut hassasiyeti sağlamak ve talaş kontrolü), yapamayacak seviyede aşınması sonucu, kullanılan takımın ömrünün bitmiş olduğu kabul edilmektedir. Aşınma veya kırılma dolayısıyla kesici takım hasarı arttığından dolayı, yüzey pürüzlülüğü ve işlenen yüzeyin hassasiyeti kötüleşmektedir. Talaşlı imalat sektöründe kullanılan takımların ömrünün belirlenmesi ve buna göre hareket edilmesi son derece önemlidir (Çolak, 2002).

Takım ömrü ölçütleri çoğunlukla yapılan talaşlı işlemin kaba ya da ince olmasına bağlıdır. Kesici takımda bir kırılma meydana gelmeden veya hatalı bir parça üretilmeden hemen önce kesici kenar değiştirilmelidir. Bu sebeple takımın değiştirilmesinde önemli olan kırılma değil aşınma miktarıdır (Çolak, 2002).

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1 Kaplamalar ve Karakterizasyonu Üzerine Yapılan Çalışmalar

Çalışkan vd. (2015), çalışmalarında aCN/TiAlN kaplamayı, Ti6Al4V alaşımının talaşlı işlenebilirliğini arttırmak için karbür kesici takımların üzerine biriktirmişlerdir. Ti6Al4V alaşımının yüzey frezelemesi sırasında aCN/TiAlN kaplamalı karbür takımların kesme performansını kuru koşullarda incelemişlerdir. Kaplanmış numunelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini; nanoindentasyon, çizik testi, 3D profilmetresi, eş odaklı mikroskop ve disk üzeri aşındırma testiyle karakterize etmişlerdir. SEM ve EDS uygulamaları ile aşınmış numunelerin yapı ve bileşim karakterizasyonunu yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, kaplanmış takımlardaki baskın takım hasarlarını abrasiv aşınma ve adeziv aşınma oluşturduğu gözlenmiştir. Yüksek aşınma direncini ve %15 daha uzun ömrü, Ti6Al4V alaşımının frezelenmesi sırasında kullanılan aCN/TiAlN kaplı karbür takımları sayesinde elde etmişlerdir. Kaplamanın, talaş oluşumunda ve iş parçasının yüzey durumunda etkili olduğunu kanıtlamışlardır. Sonuç olarak, adezyon, aşınma direnci, yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu özellikleri bakımından aCN/TiAlN kaplamaların iyi bir performans gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Nohava vd. (2015), çalışmalarında nanoyapılı Al-Cr esaslı oksinitrür ve oksit kaplamaların yüksek sıcaklıklardaki tribolojik testlerinde ortaya çıkan sonuçları değerlendirmişlerdir. Tribolojik disk üzeri aşındırma testini oda sıcaklığı ile 800 °C sıcaklık değerleri arasında uygulamışlar ve sonuçları AlTiN kaplaması ile karşılaştırmışlardır. AlCrN ve AlCrON kaplamaları 600 °C'ye kadar makul bir aşınma direnci gösterirken 800 °C'de iki kaplamada yeterli aşınma direnci göstermede başarısız olmuştur. (AlCr)₂O₃ oksit kaplama 800 °C'ye kadar üstün bir aşınma direnci göstermiştir. Yüksek sıcaklıklardaki aşınma izlerinin gösterimini ve kimyasal analizini aşınma mekanizmalarının anlaşılmasında kullanmışlardır. Çeşitli yüksek sıcaklık şartlarında aşınma oranını etkileyen ana faktörler olarak kaplamaların oksidasyon direncini ve alt tabakaların oksidasyon geciktirici kabiliyetlerini göstermişlerdir.

Chang vd. (2014), çalışmalarında, Ti6Al4V alaşımının kuru talaşlı imalatında TiAlN, CrAlSiN ve TiAlSiN kaplamaların karbür kesici takımların aşınma davranışı ve kesme performansına etkisini incelenmişlerdir. Tungsten karbür freze uçların üzerine katodik ark buharlaşma yöntemi ile TiAlN, CrAlSiN ve TiAlSiN biriktirmişlerdir. Nano kristal yapıdaki TiAlSiN kaplı takımların TiAlN kaplı takımlara kıyasla daha kısa ömürlü olduğu ve 350 m/dk'lık yüksek kesme hızlarında CrAlSiN kaplı takımların ömrünün TiAlSiN ve TiAlN kıyasla daha fazla olduğunu bulmuşlardır. CrAlSiN kaplama, Ti6Al4V alaşımlarının kuru talaşlı şekillendirmesinde yüksek aşınma direnci göstermektedir. En iyi kesme performansını CrAlSiN kaplamadan elde etmişlerdir.

Çalışkan vd. (2013), çalışmalarında sinterlenmiş karbür altlıklar üzerine magnetron sıçratma yöntemi ile nano tabakalı AlTiN/TiN kaplama biriktirmişlerdir. Talaşlı imalat endüstrisinde nano tabakalı yapının, koruyucu kaplamanın oksidasyon davranışı üzerine etkisini yüksek sıcaklıktaki oksidasyon testleri doğrultusunda araştırmış ve bu çalışmanın temelini oluşturmuşlardır. Biriktirilmiş kaplamayı 1000 °C'de, farklı sürelerde tavlamışlardır. Oksidasyon testlerinin öncesinde ve sonrasında, kaplamanın kompozisyonunu, yapısını ve fazlarını taramalı elektron mikroskobu, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi ve X-ışını kırınımı ile tespit etmişlerdir. Özetle, nanotabakalı yapının kesici takımların oksidasyon direncini iyileştirdiği, böylece takım ömrünü arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır.

Aihua vd. (2012), çalışmalarında TiN, TiAlN, AlTiN ve CrAlN kaplamaları YG6 (WC + %6 Co) karbür kesici takımlar üzerine katodik ark buharlaştırma tekniği ile biriktirmişlerdir. Kaplamaların sürtünme ve aşınma özelliklerini yüksek hızdaki SiC bilyeler kullanarak bilye-disk metodu ile inceleyip, karşılaştırmışlardır. Test sonuçlarını taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışınları difraksiyonu, enerji dağılımlı X-ışınları, mikrosertlik test cihazı ve optik profilmetre ile değerlendirmişlerdir. Sonuçlar doğrultusunda TiN ve TiAlN kaplamaları düşük sürtünme katsayısı ve düşük aşınma oranı ve yüksek miktarda Al içeren AlTiN ve CrAlN kaplamaları düşük aşınma direnci özellikleri göstermiştir. Mikro oluklar ve kısmi çatlaklar gözlenmesine karşın TiAlN kaplaması diğer kaplamalara kıyasla daha iyi tribolojik özellikler göstermiştir. Yüksek Al miktarı AlTiN kaplamalardaki kimyasal reaktifliği arttırmış ve çeşitli adeziv aşınmaları

gidermiştir. CrAlN kaplaması ise daha iyi anti kavlama ve anti adezyon özellikleri göstermiştir.

Chen vd. (2012), çalışmalarında katodik ark buharlaştırma yöntemi kullanılarak takım yüzeylerine çok tabakalı TiAlSiN, TiN, ve AlTiN filmler biriktirmişlerdir. Numunelerin film yapılarının karakteristiğini, inceliğini ve bileşimlerini taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemişlerdir. Aşınma testleri ve nanoindentasyon sertlik testleri yaparak sürtünme katsayıları ve ince film adezyonunu değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, TiN filminin sürtünme katsayısının, zayıf yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak oldukça düşük olduğu görülmüştür. Tane boyutu mukavemetine bağlı olarak TiAlSiN ve AlTiN filmlerin sertliğinin TiN filminden daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Üç filmde de HF1-HF4 seviyelerinde adezyon mevcuttur. Bu üç kaplamanın termal kararlılıklarına bakıldığında, TiAlSiN filmi x ışınları kırınımı verileri doğrultusunda 900 °C'ye kadar oksidasyon dayanımı göstermiştir ve bu özelliği onun termal kararlılığının diğer filmlere göre daha iyi olduğunu göstermektedir.

Podgursky vd. (2011), çalışmalarında kesici takımların aşınma sürecinde, sürtünme katsayısı bağıntıları ile geometrik yüzey parametrelerini birbirleri ile bağdaştırmışlardır. TiN, TiAlN ve AlTiN kaplamaları döner katodik ark buharlaştırma cihazı kullanılarak hazırlamışlardır. WC-Co yüzeyinin pürüzlülüğünü R_a 0,05-0,2 arası ve kaplamanın kalınlığını $2,3 \pm 0,2$ olarak belirlenmiştir. Geometrik yüzey parametrelerini (pürüzlülük, eğrilik ve basıklık) AFM ile değerlendirmiş ve aşındırma testlerini 2 N'luk yük altında 10 mm çaplı alüminyum bilyeler, 100 µm kayma mesafesi ve 10 Hz frekansta gerçekleştirilmiştir. Kaplamadaki makro parçacıkların dağılımı geometrik yüzey parametrelerini oldukça etkilemektedir ve makro parçacıkların sayısı Al miktarının artması ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Kaplama yüzeyinin pozitif eğriliği halinde basıklık istatistiksel olarak sürtünme katsayısı üzerinde büyük bir etki sağlamaktadır. Sürtünme katsayısının basıklık ölçüsüne bağlı olduğu anlaşılmıştır. Basıklık ölçüsü kaplamalar arasındaki en yüksek değerini TiN'de alır. Özetle, sürtünme katsayısındaki en düşük artış oranını TiN kaplamasında gözlemlenmektedir.

Yıldız vd. (2010), çalışmalarında kalça eklemi implantları olarak kullanılan 316L paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımı üzerine magnetron sıçratma işlemi ile TiAlN ince film biriktirmişlerdir. TiAlN ince filmin adezyon davranışını, çizik test cihazlarıyla

incelemişlerdir. Bu testte her örnek için üç ayrı yük kullanılmıştır. Çizik testi sırasında yapılan gözlemler LC_1 , LC_2 , LC_3 olarak tanımlanan üç temel hasar göstermiştir. Hasar mekanizmalarının çizik izleri SEM incelemelerine göre değerlendirmişlerdir. Yoğun ve homojen yapısı ile TiAlN filmler 316L paslanmak çelik (200) ve Ti6Al4V alaşımı (111) düzleminde büyümüştür. En iyi sürtünme katsayısını (111) düzleminde biriktirilen filmlerden elde edilmiştir. Test sonuçları talaş alma, pullanma ve dökülme mekanizmalarının ince filmlere zarar verdiğini göstermiştir.

Wo vd. (2010), çalışmalarında ince TiN sınır tabakası eklenmiş TiSiN nano kaplamaların tek eksenli iz testi tarafından açığa çıkarılan deformasyon mekanizmalarının etkilerini, deforme olmuş numunelerin enine kesitleri aracılığı ile incelemişlerdir. Nanoindentasyon testi ile tek tabakalı TiSiN kaplamaların tek tabakalı TiN kaplamalardan daha sert olduğunu göstermişlerdir. Çok katmanlı örneklerin sertlik değerleri, TiSiN/TiN çok tabakalı kaplamaların içine yerleştirilmiş TiSiN katmanının kalınlığı ile birlikte artmıştır. Daha sünek TiN tabakaları TiSiN/TiN çoklu tabakalarının içine yerleştirildiğinde, kaplamaların içindeki çatlakların yoğunluğu azalmış ve bazı TiN taneciklerinin yakınlarındaki TiSiN tabakalarının içine yayılmıştır. Bu taneciklerin dizilişi çatlakların büyümesini engellemiştir. Sonuç olarak TiN tabakalarının, sert olan TiSiN tabakalarındaki hasarın derecesini azaltarak yapısal bütünlüğün korunmasına yardımcı olduğu anlaşılmıştır.

Podgursky vd. (2010), çalışmalarında yüzey geometrisinin sert kaplamaların tribolojik davranışlarına olan etkisini incelemişlerdir. TiN, TiAlN ve AlTiN kaplamalarını katodik ark buharlaştırma yöntemi kullanılarak yüksek hız çeliği üzerine biriktirmişlerdir. Yüzey topolojisini ($50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ ve $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ yüzey alanı) atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile incelemişlerdir. Kesme işlemi esnasında sürtünme katsayısı değerini etkileyen faktörleri ve mekanizmaları tespit etmişlerdir.

Özel vd. (2010), çalışmalarında Ti6Al4V alaşımının, çok tabakalı kaplamalar biriktirilmiş kesici uçlar ile tornalama işlemini incelemişlerdir. Bu çalışmayı Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde kullanılan tungsten karbür kesici uçların kaplanmamış, TiAlN kaplı ve TiAlN+cBN kaplı halleriyle yürütmüşlerdir. Uygulanan kuvvet ve oluşan takım aşınmasını ölçmüşlerdir. Kesici uçlara ait talaş oluşumu, kuvvet, sıcaklık ve takım aşınması parametrelerini tahmin etmek için 3D sonlu elemanlar modelinden yararlanılmıştır. Sonlu

elemanlar analizi tarafından elde edilmiş talaş oluşumu verilerinin simülasyonu ve kaplanmış uçlar üzerindeki sıcaklık dağılımının incelenmesi için birim deformasyon yumuşaması etkisi ile güçlendirilmiş malzeme modellerini geliştirmişlerdir. Hesaplanan kuvvetleri ve takım aşınması değerlerini doğrulama deneyleri ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak kaplanmış kesici uç tasarımında, sıcaklık dağılımının ve takım aşınmasının etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Bhatlacharyya vd. (2008), çalışmalarında kalınlık oranı 9:1 değerinde olan nano ölçekli çok tabakalı Al/TiN kaplamaları reaktif sıçratma yöntemi ile biriktirmişler ve 1-50 nm kalınlığındaki TiN tabakasının mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Nanoindentasyon metodu ile ölçülen sertlik değerleri, tabaka kalınlığının azalması, sertlikte artış göstermiştir. Mikroyapısal analizleri yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ile yapmışlardır. Dislokasyon kuvvet modelini ve sertleşme mekanizmasını anlamak için kullanmışlardır.

Chang vd. (2007), çalışmalarında derecelendirilmiş ve çok tabakalı $Al_xTi_{1-x}N$ nanokristal kaplamaları katodik ark buharlaştırma (CAE) ile sentezlemişlerdir. Farklı Al/(Ti+Al) oranındaki $Al_xTi_{1-x}N$ nanokristal kaplamanın biriktirilmesinde $Ti_{33}Al_{67}$ ve $Ti_{50}Al_{50}$ alaşımlarını katot olarak kullanmışlardır. Atomik ve iyonize Ti, atomik Al, uyarılmış ve iyonize N_2 ve N_2^+ eksitasyonları, iyonizasyonları ve $Al_xTi_{1-x}N$ kaplaması prosesinde meydana gelen plazma Al-Ti-N yük aktarımı reaksiyonlarını plazma numunelerin optik emisyon spektrometresi ile ortaya çıkarmışlardır. Tercih edilen (111) düzlemini yüksek Al/(Ti+Al) atomik bileşen oranı (0,63) ve küçük tane boyutu (29nm) ile $Al_{0.67}Ti_{0.33}N$ üzerinde göstermişlerdir. Derecelendirilmiş $Al_{0.67}Ti_{0.33}N/TiN$ en yüksek sertlik değerine ($Hv_{25g} 3850 \pm 180$) sahiptir. Ancak çok tabakalı $Al_{0.67}Ti_{0.33}N/TiN$ kaplanması düşük artık gerilme oluşturmaması özelliği ile takım ömrünü arttırmıştır. Kaplamaların aşınma performansının ve mekanik özelliklerinin, çok tabakalı Al/(Ti+Al) bileşimi ile iyileştiğini gözlemlemişlerdir.

3.2 Takım Ömrü, Takım Aşınması, Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Yapılan Çalışmalar

Pramanik vd. (2015), çalışmalarında titanyum alaşımlarının talaşlı işlenebilirliğini artırmak için farklı metotlar incelemiş ve aralarında bağlantı kurmuşlardır. Titanyum alaşımlarının talaşlı imalatı sırasında deformasyon mekanizmalarının, talaş oluşumu, yüksek sıcaklık, kesme takımlarında yüksek gerilim ve yüksek takım aşınması gibi temel sorunlara neden olduğunu bulmuşlardır. Bu sorunlar birbiriyle bağlantılı ve birbirini etkileyen sorunlardır. Talaş oluşumu, kesme kuvvetlerinde varyasyona neden olur ki bu da kesici takımlardaki yüksek gerilimleri oluşturur. Diğer yandan, titanyum alaşımlarının düşük ısıl iletkenliği yüksek sıcaklıkların oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, takım aşınması için elverişli bir ortam oluşmasına sebep olmuştur. Titreşim analizi kiti, yüksek basınçlı soğutucu, dondurucu soğutma, termal gelişmiş talaşlı işleme, karma talaşlı işleme ve yüksek iletkenli kesici takım ve takım tutucu kullanımı sayesinde, titanyum alaşımının talaşlı imalatı geliştirilmiştir.

Ghani vd. (2012), çalışmalarında, kaplanmış karbür kesici takımların, frezeleme sırasında yüklenme ve yükleneme etkisine bağlı olarak gerçekleşen aşınma durumunu incelemişlerdir. Takım aşınması yüzey kalitesi, hassasiyeti ve son olarak kesme işleminin ekonomikliği açısından takım ömrüne ters etki etmektedir. Kaplanmış karbür takımların aşınmasına neden olan frezeleme parametrelerinin, kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve kesme sıvısı olduğunu tespit etmişlerdir. Kaplanmış malzeme, kaplama özelliğini yitirdikten sonra, aşınma, önce talaş yüzeyi ve yanakları boyunca ilerler, ardından alt katman malzemesine yayılır. Talaş yüzeyi ve yanakları boyunca oluşan aşınma, kesici ucun bazı bölgeleri üzerinden gerilme yoğunluğuna sebep olmaktadır. Bu durum önce bir mikro çatlak ile başlar, daha sonra kesikli frezeleme prosesi boyunca yüklenme ve yükleneme etkisine göre yayılmaya devam eder ve kaplama malzemesinde gevrek kırılma meydana geldiğinde durmuştur. Titanyum alaşımlarının frezelenmesi sırasında karbür kesici takımların kesme hızı ve ilerleme değerlerine bağlı olarak aşınması ve karbür kesici uçların çok kullanımından dolayı kesici uçların zarar görmesi temel sebepler olarak görülmüştür.

Birmingham vd. (2012), çalışmalarında yüksek hızda Ti6Al4V alaşımının tornalamasında kullanılan iki tane kaplanmamış karbür takımın aşınma mekanizmalarını ve takım ömrünü incelemişlerdir. Isıl işlemle desteklenmiş talaşlı işlemenin kesme kuvvetlerini azalttığı gözlemlenirken, bu prosesin takım ömrüne zararlı bir etkisi olduğunu bulmuşlardır. Bunun sebebi, ısıl işlemle geliştirilmiş talaşlı işleme boyunca, difüzyonla desteklenmiş aşınma mekanizmasının artmış olmasıdır. Literatürde kriyojenik işlem uygulanmış karbür kesici takımların kesme parametreleri karşılaştırılmıştır. Kriyojenik işlem sonucunda adezyon-difüzyon aşınmasının engellendiği ve takım ömrünün uzadığı tespit edilmiştir.

Zeman vd. (2008), çalışmalarında Ti6Al4V alaşımının sert metal takımlarını kullanarak klasik ve yüksek hızda frezeleme performanslarını değerlendirmişlerdir. Takım ömrünü ve kesme kuvvetlerini çeşitli kesme şartları altında gözlemlemişlerdir. Kesici takım malzemesi, kaplama, kesme hızı, ilerleme ve kesme şartlarının takım ömrünü ve enerji tüketimini etkileyen en önemli faktörler olduğunu tespit etmişlerdir. Test edilen her takım ve kaplama için özel olarak optimum koşullar saptamışlardır.

Haron vd. (2004), çalışmalarında kaplanmamış karbür kesici takımlarla, kaba talaşlı işlenmiş Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Deneyler farklı kesme hızları, kesme derinlikleri, ilerleme oranları ve kesici uçlar ile kuru kesme şartları altında yapılmıştır. Bu parametreler doğrultusunda işlenmiş yüzeyin yüzey pürüzlülüğü, mikro sertliği ve pekleşmesi ölçülmüş ve taramalı elektron mikroskobu ile bu ölçümler desteklenmiştir. Sonuç olarak, titanyum alaşımının yüzeyi zayıf işlenebilirlik kabiliyeti yüzünden kolayca zarar görmüştür. İşlenmiş yüzeyin mikro yapısında ayrışmalar ve üst katmanındaki mikrosertlik değerlerinde artış gözlemlemişlerdir. Kör takımlarla yapılan talaşlı şekillendirmeler sonucunda işlenmiş malzeme yüzeyinin mikro yapısındaki ayrışmaların daha önemli seviyede olduğunu tespit etmişlerdir.

Kumar vd. (2014), çalışmalarında FEM analizleri ile Ti6Al4V alaşımının frezelenmesinde kesici takım kuvvetlerini ve gerilmelerini doğrulayarak kesici takımın optimum tasarımını incelemişlerdir. Başlangıçta, teorik takım kuvvetleri Lee & Altinas modeli esas alınarak, kesici takım üzerindeki kesici uç küresel/düz düzlemin üzerinde bir kesişimin kavisi olarak hesaplanmıştır. Kesici takım parametreleri en düşük takım kuvvetleri esas alınarak kabul edilmiş ve parmak kesici takımın optimal tasarımı farklı boyutlar için oluşturulmuştur. Daha sonra kesici takım için 3D CAD modelleri geliştirilerek, Ti6Al4V alaşımının

frezelenmesinde Sonlu Eleman Metodundan yararlanarak kesme kuvvetlerini tespit etmişlerdir. Kesme kuvvetleri, gerilme, gerilim yoğunluğu, takım aşınması ve farklı geometrik şekillere göre kesici takım sıcaklığı, Ti6Al4V alaşımının iş parçası olarak kabul edilmesine göre simüle etmişlerdir. Sonuç olarak, teorik ve simülasyon değerleri karşılaştırılmış ve farklı boyutlar için kesici takımların optimal tasarımını doğrulamışlardır. Mevcut yaklaşım, işleme yüzeyinin kalitesini artırmak ve takım ömrüne etki eden farklı parametreleri kullanarak takım ömrünü uzatmaya yönelik olmuştur. Simülasyonu yapılmış çeşitli test çalışmaları en iyi kesici takımın tasarımlarının ortaya çıkarılmasını sağlamıştır.

Silva vd. (2013), çalışmalarında Ti6Al4V alaşımının yüksek kesme hızı şartlarında, yüksek basınçlı soğutucu sıvılarla desteklenmiş talaşlı şekillendirilmesinde kullanılan kristalli elmas takımların davranışlarını incelemişlerdir. Takım ömrü farklı tribolojik şartlarda ve baskın aşınma mekanizmalarında incelenmiştir. Aşınma mekanizmalarını oluşturan iki ana faktörün adezyon ve sürtünme kaynaklı aşınma olduğunu tespit etmişlerdir. Yapılan deneyler doğrultusunda soğutucu sıvı basıncındaki artışın takım ömrünü iyileştirdiği ve adezyon eğilimini azalttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Jianxin vd. (2008), çalışmalarında 800 °C ve altındaki sıcaklık şartlarında Ti6Al4V alaşımından WC/Co karbür kesici takımlara olan element difüzyonunu incelemişlerdir. Difüzyon çiftlerinin morfolojisini taramalı elektrik mikroskobu ile gözlemlemişlerdir. Ti6Al4V alaşımı üzerine yapılan yağsız torna testini WC/Co karbür takımları ile yürütmüşlerdir. Sonuçlar, W ve Co elementlerinin 400 °C’de Ti6Al4V alaşımının içine iyi nüfuz etmediğini, 600 °C’de uzun bir süre sonunda nüfuz ettiğini ve 800 °C’de ise derinlemesine (20 µm) nüfuz ettiğini göstermiştir. Difüzyon çiftlerinin ara yüzeyi yakınındaki sertlik değerlerini ara yüzeyin uzağında bulunan sertlik değerlerinden daha düşük bulmuşlardır. Sonuç olarak talaşlı şekillendirme prosesinde ki talaş-ara yüzey ikilisi arasında Ti6Al4V alaşımından WC/Co karbür takımlarına doğru olan element difüzyonu, takımın alt yüzey bileşimde takım aşınmasını hızlandıran bir değişikliğe sebep olmuştur.

Arulkirulbakaran vd. (2015), çalışmalarında, Ti6Al4V iş parçası imalatı sırasında kesici takımın talaş yüzeyindeki yüzey dokusu üzerinde oluşan zararlı etkilerini azaltmak için bir girişimde bulunmuşlardır. Ti6Al4V alaşımlarının imalatı üzerine takım yüzey dokularıyla pek çok sayısal simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Talaşlı imalat sürecinin sayısal

simülasyonunu, Lagrangien formülasyonu kullanan 3D yazılımla oluşturmuşlardır. Eşleşmiş termo-mekanik analizler, imalat boyunca sıcaklık dağılımını, işleme kuvvetlerini, takım aşınmasını ve talaş morfolojisini öngörmek için Johnson-Cook malzeme modelleri kullanılarak yapılmıştır. Ti6Al4V alaşımının torna deneyleri yüzey dokusunda tungsten karbür takımlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Takım-talaş ara yüzeyinin sıcaklık dağılımını kızılötesi termal görüntüleyici kamera ile ölçmüşlerdir. Hız, itme ve kesme kuvvetleri üç bileşenden oluşan bir dinamometre ile ölçülmüştür. Takım aşınması ve talaş morfolojisi, optik mikroskop resimleri kullanılarak yakalanmış ve analiz edilmiştir. Sonuç olarak, kesici takımların, talaşın akma yüzeyine dik olan yüzey yapıları kesme kuvvetinde ve sıcaklık üretiminde büyük bir düşüşe neden olmakta ve takım aşınmasını azaltmaktadır. Fang vd. (2008), çalışmalarında aynı imalat kurulumunu kullanarak Ti6Al4V ve Inconel 718 alaşımlarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Bu çalışma, kesici uç geometrisinin belirleyici rolünü ve yüksek hızda talaşlı imalatını içermektedir. Deneysel kurulum, kesici kuvvetlerin ve kesici uç yarıçaplarının ölçüm metotları ortaya konmuştur. Toplamda 40 tane ortogonal yüksek hızda kesme testleri yapmışlardır. Bu testlerde beş farklı kesme hızı ve dört farklı talaş yüzeyi kullanmışlardır. Kapsamlı deneysel verilere dayanarak, Ti6Al4V ve Inconel 718'in yüksek hızda talaşlı imalatı arasındaki benzerlik ve farklılıklar nicelik olarak karşılaştırılmış ve nitelik olarak 4 parametre (kesme kuvveti, gerilme kuvveti, bileşke kuvvet ve kuvvet oranı) incelenmiştir. Sonuç olarak 12 adet deneysel regresyon ilişkisi elde etmişlerdir.

Ali vd. (2013), çalışmalarında Ti6Al4V titanyum alaşımının yüzey frezelenmesi sırasında, pürüzlü yüzeyin ilerleme hızının ve kesme kuvveti bileşenlerinin etkilerine değinmişlerdir. Deneylerin tasarımını, talaşlı imalatın ilerleme hızının etkilerine göre değişimlerini ölçmek üzere oluşturmuşlardır. Bu etkiler, yüzey pürüzlülüğü ve Ti6Al4V alaşımının kesici takımlarla işlenmesi sırasındaki, yüzey frezelemede kullanılan kesme kuvvetleri bileşenleridir. Deneyler, kuru kesme koşullarında kesme hızı ve kesme derinliği sabit kalırken, farklı ilerleme hızlarında uygulanmıştır. Sonuçlar, doğrudan bir deneysel model oluşturmak ve yüzey pürüzlülüğü üzerinden ilerleme ve kesme değerlerini tahmin etmek için, yüzey pürüzlülüğünü direkt ölçmek yerine Sonlu Eleman Metodunu kullanarak tahmin edilebileceğini göstermiştir. Bunun sebebi yüzey pürüzlülüğü, ilerleme ve kesme arasında bir ilişki bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, Sonlu Eleman

Modelleme (FEM) kullanıp bir tahmin modeli yaratarak, ilerleme, kesme ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkinin anlaşılması sağlanmıştır.

Rashid vd. (2015), çalışmalarında titanyum alaşımlarının 60 m/dak'dan yüksek hızlarda karbür kesici takımlarla işlenirken, takımların kısa sürede aşındığını göstermektedirler. Titanyum alaşımlarının giderek artan kullanımıyla beraber, üretim maliyetlerini azaltmak için takımların hızlı aşınmasının önüne geçilmiştir. Çalışmalarında, kuru kesme koşulları altında, 150 m/dak kesme hızında, Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde kaplanmamış karbür kesici takımlar kullanarak takım aşınma mekanizmalarını araştırmışlardır. Kesici takım üzerinden talaş kaldırılmasının adezyon, difüzyon ve aşınmaya bağlı olduğunu bulmuşlardır. Kesici ucun plastik deformasyonunun talaş yüzeyinin zayıflığı yüzünden gerçekleştiğini rapor etmişlerdir

BÖLÜM 4

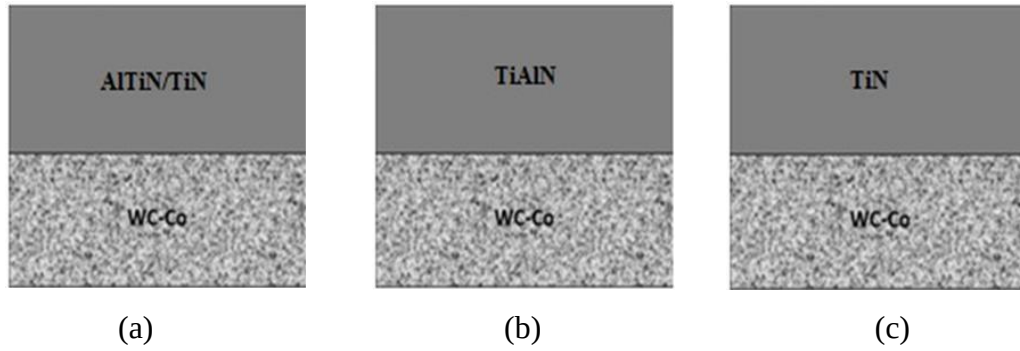
MATERYAL VE YÖNTEM

4.1 Materyal

Bu bölümde, deneysel çalışmalar sırasında kullanılan kaplamalar, altlık malzemeler, kesici takım, takım tutucu ve iş parçası malzemesi hakkında detaylı bilgi verilmektedir. Ayrıca, deneysel çalışmalar sırasında kullanılan cihazlar ve tezgâhlar hakkında da bilgi verilmiştir.

4.1.1 Kaplama Malzemesi

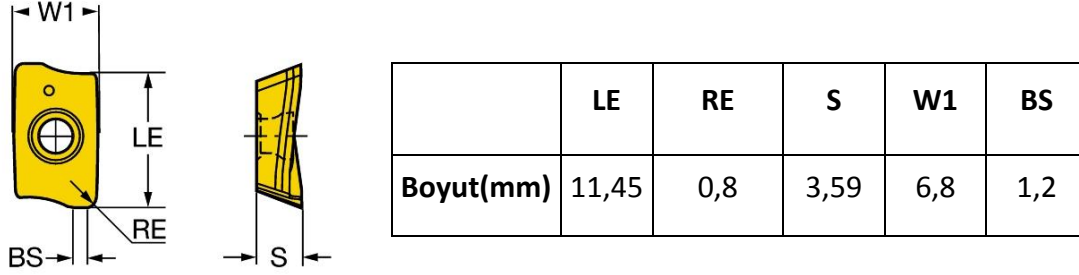
Tez çalışmasında, karbür kesici takımların kesme performansını ve aşınma davranışını iyileştirmek amacıyla nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalar, altlık malzemesi olan sinterlenmiş karbür (WC-Co) kesici takımlar ve AISI D2 soğuk iş takım çeliği diskler üzerine biriktirilmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla tek tabakalı TiN ve tek tabakalı TiAlN kaplamalarda ayrıca biriktirilmiştir. Biriktirilen kaplamaların şematik resmi Şekil 26'da gösterilmiştir.



Şekil 26: Kullanılan sert kaplama yapılarının şematik gösterimi (a) Nanotabakalı AlTiN/TiN, (b) Tek tabakalı TiAlN, (c) Tek tabakalı TiN (Çalışkan vd., 2015).

4.1.2 Kesici Takım

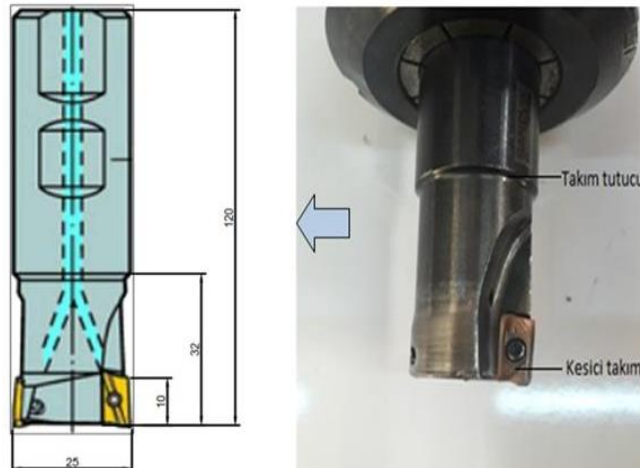
Kaplamaların kesme performansı ve aşınma davranışını incelemek amacıyla Sandvick firmasına ait R390-11 T3 08M-KM H13A kod numarasına sahip kaplamasız sinterlenmiş karbür kesici takımlar kullanılmıştır (Şekil 27).



Şekil 27: Karbür kesici takımların boyutu (Sandvik, 2015).

4.1.3 Takım Tutucu

Kesme testlerinde iki ağızlı Sandvick firması tarafından üretilmiş olan R390-025A25-11L kodlu, kesme çapı 25 mm olan takım tutucu kullanılmıştır. Sabit kesme şartlarının sağlanabilmesi amacı ile testler takım tutucu üzerinde sadece bir takım varken gerçekleştirilmiştir (Şekil 28).



Şekil 28: Takım tutucu ve boyutları (Sandvik, 2015).

4.1.4 İş Parçası Malzemesi

Kaplamalı karbür takımlar ile gerçekleştirilen kesme performansı ve aşınma testlerinde Ti6Al4V alaşımı iş parçası olarak kullanılmıştır. İş parçası malzemesi, düşük termal iletkenlikleri (yaklaşık 6,7 W/mK) nedeniyle, işlenmesi zor malzemelerden biri olarak görülmektedir (Ribeiro, 2003). Kesme sırasında oluşan ısı yavaş dağılmakta ve kesici takımın ve iş parçasının sıcaklığının aşırı derecede artmasına sebep olmaktadır. Oluşan yüksek sıcaklıklar kesici takımın ömrünü kısaltmakta ve ayrıca işlenen yüzey kalitesini kötüleştirmektedir (Basturk, 2010). İş parçası malzemesinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 3 ve 4 'te verilmiştir.

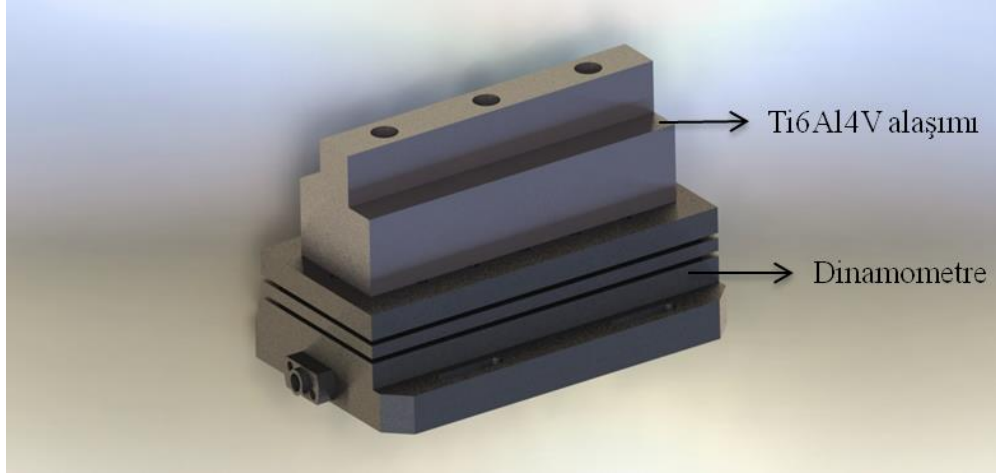
Tablo 3: Ti6Al4V alaşımının kimyasal birleşimi (Mavi, 2013).

%N	% C	%H	%Fe	%O	%Al	%V
0,08	2	0,75	0,045	0,03	16-18	10-14

Tablo 4: Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri (Mavi, 2013).

Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı	Sertliği Rockwell C	% Uzama
900-1100 MPa	830 MPa	36	10

Kesme işlemi için iş parçası Ø100x150 mm boyutlarında silindir halinde temin edilmiş ve talaşlı imalat ile işlenmiştir. Kesme kuvvetlerinin ölçülebilmesi amacı ile iş parçası üzerine matkap ile üç adet kademeli delik açılmıştır (Şekil 29). İş parçası malzemesinin her bir yüzünden beş farklı yerden sertlik ölçümü yapılmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak iş parçası malzemesinin sertlik değeri olarak 36HRC bulunmuştur. ISO 8688-1 standartlarına göre, frezede işlenecek parçanın malzemesinin ölçüleri, takım tutucunun çapının en az 3 katı kadar boy ve 0,6 kadar kesme genişliği ölçülerinde olması tavsiye edilir (ISO 8688-1, 1989).



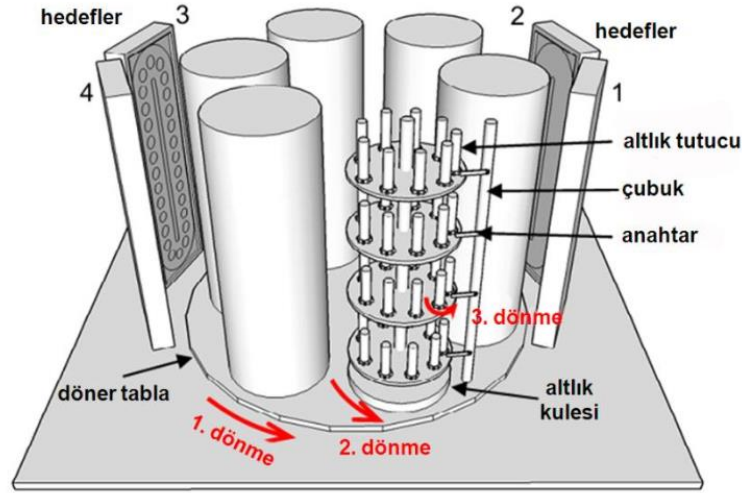
şekil 29: Kesme testlerinde hazırlanan Ti6Al4V alaşımının şematik görüntüsü.

4.1.5 Kullanılan Cihaz ve Sistemler

Bu bölümde, kaplamaların biriktirilmesinde ve karakterizasyonunda kullanılan cihaz ve sistemler ile birlikte, kaplanmış karbür kesici takımların kesme performansı ve aşınma testlerinde kullanılan cihaz ve ekipmanlar hakkında bilgi verilmektedir.

4.1.5.1 Kaplama  nitesi

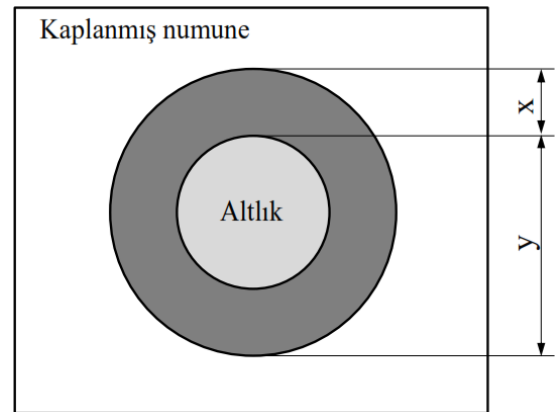
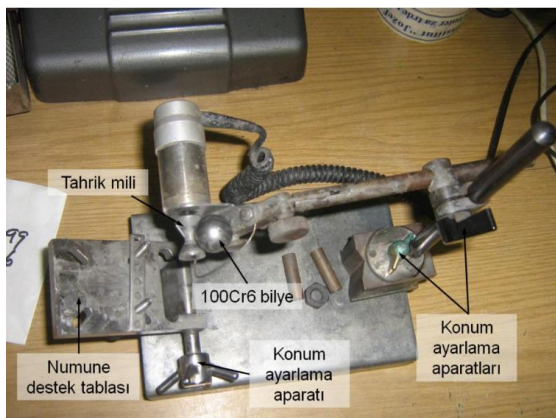
Çok tabakalı kaplamalar CemeCon'un iki farklı endüstriyel kaplama sistemi ile hazırlanır: CC800/7 ve CC800/9 SinQ_x ML. Bu iki sistem arasında çok küçük farklılık bulunur. Her iki sistemde 4 adet dengelenmemiş düzlemsel magnetron kaynak bulunur. Bu kaynaklar alt tabaka ile birlikte ortak dönme merkezine sahiptir. CC809/9'un şematik görüntüsü şekil 30'da verilmiştir. Döner tabla 6 adet altlık kulesine sahiptir. Altlık kulelerinde küçük altlık tutucu uçlar bulunur. Bu uçlar takımları tutmak için kullanılır. Döner tabla bir eksen etrafında döner ve farklı dişli mekanizması ile altlık kuleleri birinci ve ikinci eksen etrafında dönme yapabilirler. Altlık tutucular 3 eksen etrafında devamlı olmayacak şekilde bir çubuk üzerinde anahtar ile sağlanmaktadır. CC800/9'da tutucular döner tablanın her yerine yükselebilir veya inebilir. CC800/7 'de ise iki tutucu yukarı iki tutucu aşağı hareket yapar.



Şekil 30: Magnetron sıçratma ile biriktirme sisteminin şematik görüntüsü (Panjan, 2010).

4.1.5.2 Bilye ile Krater Açma Cihazı

Biriktirilen kaplamaların kalınlıklarını belirlemek amacıyla bilye krater açma cihazı kullanılmıştır. AISI D2 altlık malzemeler üzerine krater izleri Şekil 31’de gösterilen özel imal edilmiş bilye ile krater açma cihazı kullanılarak oluşturulmuştur. Bilye olarak, AISI 52100 çeliğinden imal edilmiş 20 mm çapında bilye kullanılmıştır. Abraziv çözelti olarak ise saf alkol ve ince taneli ($1\mu\text{m}$) elmas pasta kullanılmıştır.



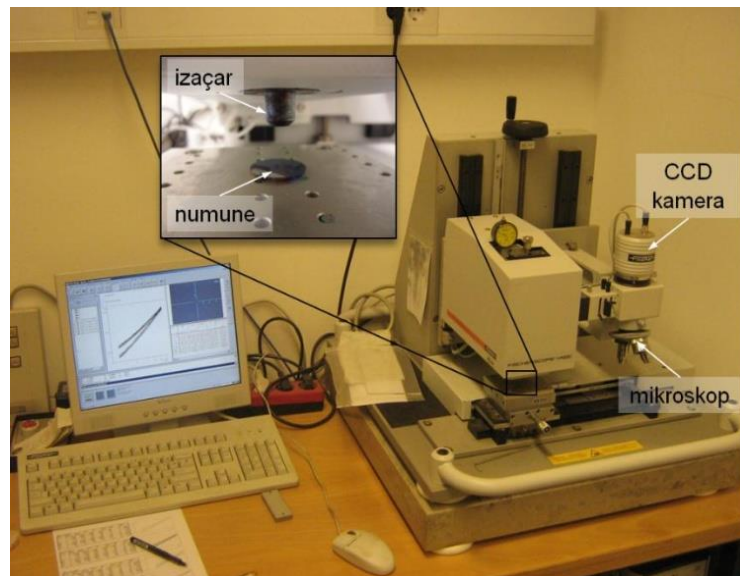
Şekil 31: Bilye ile krater açma cihazı (Çalışkan, 2012).

Atlık malzeme ve kaplama üzerinde oluşan krater izleri üzerinde, mikroskop yardımı ile x ve y uzunlukları ölçüldükten sonra, bilye çapı (D_b) kullanılarak Eşitlik 1 yardımı ile kaplama kalınlığı (d_k) hesaplanmaktadır (Holmberg ve Matthews, 2009).

$$d_k = \frac{x.y}{D_b} \quad (1)$$

4.1.5.3 Nanoindenter

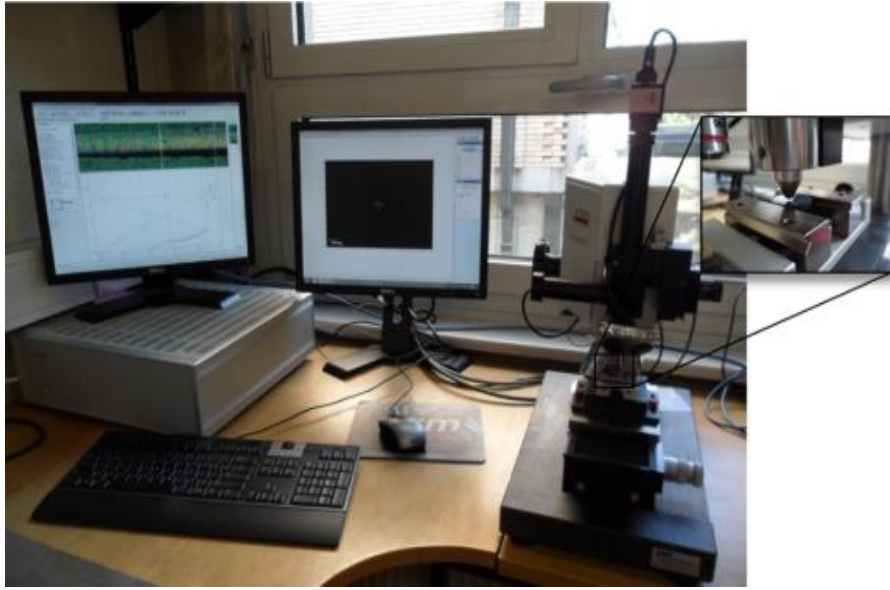
Kaplamaların mikrosertliklerinin, elastisite modülünün ölçülmesi ve deformasyon enerjilerinin hesaplaması amacı ile nanoindenter cihazı kullanılmıştır. Kaplamaların mikrosertlik ölçümleri için Fischerscope H100C nanoindenter kullanılmıştır (Şekil 32). Mikrosertlik ölçümleri 50 mN maksimum kuvvet kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümlerinin altlıktan etkilenmemesi için kaplamadaki iz derinliğinin, kaplama kalınlığının 1/10 'unu geçmemesi gerekmektedir. Bunun anlamı şudur; 1 μ m kaplama kalınlığı için, iz derinliği 100 nm'den az olmalıdır. Bu yüzden ölçüm hatlarını azaltmak için küçük iz kuvvetleri kullanılır. Ayrıca sertlik ölçümlerinde pürüzlülük etkisi de önemlidir. Eğer iz derinliği ortalama yüzey pürüzlülüğünden 20 kat fazla ise yüzey pürüzlülüğünün etkisi minimize edilmektedir. Yeterli istatistik ve ölçüm hatalarını elemek için en az 3 ölçüm yapılmalıdır (Panjan, 2010).



Şekil 32: Fischerscope H100C nanoindenter (Çalışkan, 2012).

4.1.5.4 Çizik Testi Cihazı

Biriktirilen kaplamaların, altlık malzemeye olan adezyon değeri CSM Revetest çizik testi cihazı ile ölçülmüştür. Bu cihaz, iz üzerinden görüntü alabilmekte ve akustik emisyon ve teğetsel kuvvet ölçümü yapılabilmektedir. Bu adezyon ölçüm cihazında, hareket eden bir elmas izaçar artan bir yük ile kaplama yüzeyine bastırılmaktadır ve iz oluşturulmaktadır (Şekil 33). Çizik testleri, 3 mm çizik uzunluğu, 1 N başlangıç yükü, 150 N maksimum normal yük ve 4,03 mm/dak indenter hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 33: CSM Revetest çizik testi cihazı (Çalışkan, 2012).

4.1.5.5 Aşınma Testi Cihazı

Kaplamaların sürtünme katsayılarının belirlenmesi amacıyla, CSM firması tarafından üretilmiş olan bilye-disk aşınma cihazı kullanılmıştır. Testlerde aşındırıcı bilye olarak 6 mm çapında Al_2O_3 bilye kullanılmış olup, lineer kayma hareketi uygulanmıştır. Kullanılan test parametreleri; 5 N normal yük, 10 cm/s kayma hızı ve 10 mm aşınma izi uzunluğudur. Testler 10000 çevrimde tamamlanmıştır (Şekil 34).



Şekil 34: CSM bilye-disk aşınma test cihazı (Çalışkan, 2012).

4.1.5.6 Profilometre

Kaplamaların yüzey topografisi Taylor-Hobson profilometre yardımı ile belirlenmiştir (Şekil 35).



Şekil 35: Taylor-Hobson profilometre (Çalışkan, 2012).

4.1.5.7 Eş-Odaklı Mikroskop

Kaplama üzerinde oluşturulan krater izleri ve çizikler ZEISS Axio CSM 700 eş odaklı mikroskop kullanılarak görüntülenmiştir (Şekil 36).



Şekil 36: ZEISS Axio CSM 700 eş odaklı mikroskop (Çalışkan, 2012).

4.1.5.8 Mikrosertlik Ölçüm Cihazı

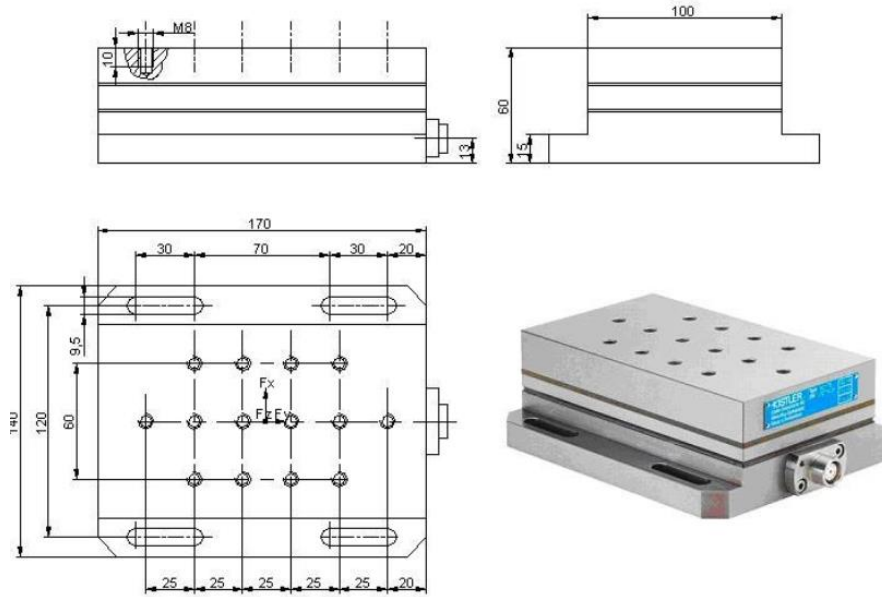
İş parçasının mikrosertlik ölçümleri, Wilson Wolpert Rockwell-C mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 37).



Şekil 37: Rockwell-C mikrosertlik ölçüm cihazı (Çalışkan, 2012).

4.1.5.9 Dinamometre

Yüzey frezeleme testleri esnasında meydana gelen kesme kuvveti bileşenlerinin ölçülmesinde Kistler firmasına ait dinamometre kullanılmıştır. Testlerde, F_x , F_y ve F_z olmak üzere 3 eksende kesme kuvveti bileşenleri ölçülmüştür (Şekil 38).



Şekil 38: Kesme kuvvetlerinin ölçülmesinde kullanılan dinamometrenin teknik özellikleri ve boyutları (Hamamcı, 2014).

4.1.5.10 Yüzey Pürüzlülük Cihazı

Kesme testlerinde, iş parçası üzerinde elde edilen yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesinde Mitutoyo Surftest SJ-310 uçlu tip yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 39). Yüzey pürüzlülüğü değeri, farklı yerlerden alınan en az üç ardışık ölçümün ortalaması olarak kaydedilmiştir.



Şekil 39: Mitutoyo Surftest SJ-310 uçlu tip yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.

4.1.5.11 Stereo Zoom Mikroskop

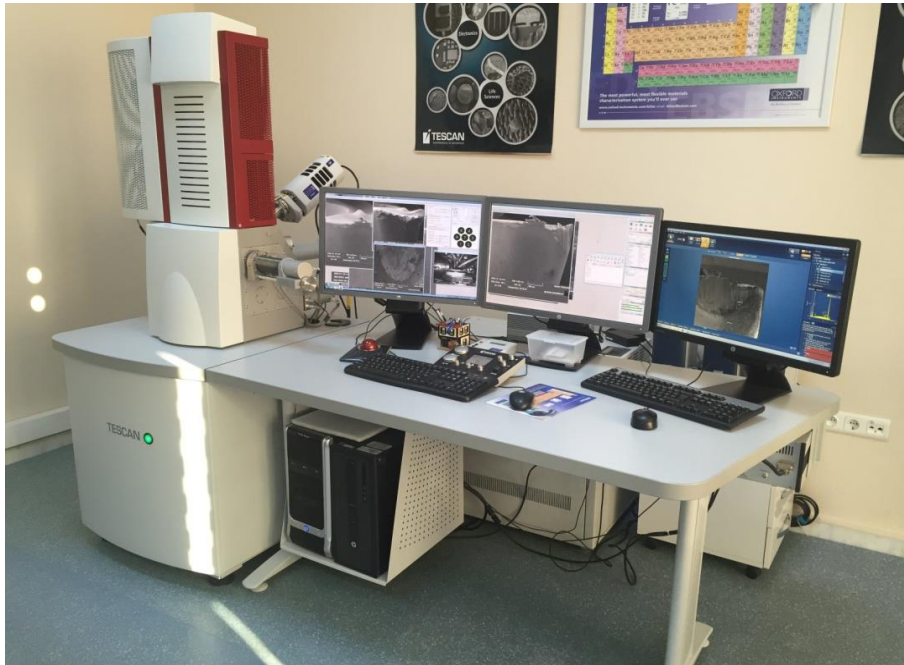
Kesici takımların aşınma fotoğraflarının çekilmesi ve aşınma miktarının ölçülmesi amacı ile yazılım destekli ve CCD kameraya sahip Vision marka Sx45 modeli stereo-zoom mikroskop kullanılmıştır (Şekil 40).



Şekil 40: Stereo zoom mikroskop.

4.1.5.12 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Kaplamaların yapılarının görüntülenmesi, kaplamalı ve kaplamasız karbür kesici takımların yüksek büyütme oranlarında aşınma fotoğraflarının çekilmesi ve aşınma mekanizmalarının belirlenmesi için TESCAN firması tarafından üretilen MAIA3 model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır (Şekil 41-42).



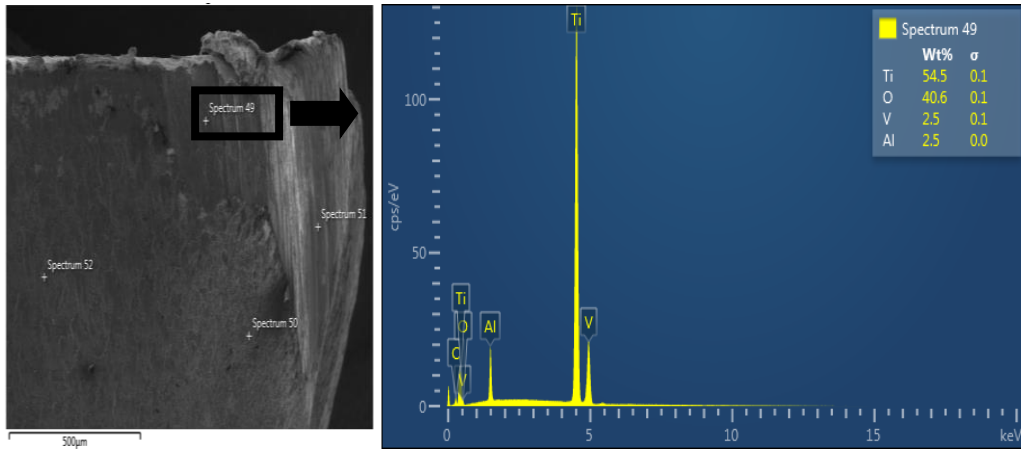
Şekil 41: TESCAN- MAIA3 model taramalı elektron mikroskobu.



Şekil 42: Kesici takımların taramalı elektron mikroskobu içindeki yerleşme görüntüsü.

4.1.5.13 Enerji Dağılımlı Spektrometre (EDS)

Kaplamaların karakterizasyonunda ve aşınmış kesici takımların aşınma bölgelerinde element analizi yapmak amacıyla enerji dağılımlı spektrometre kullanılmıştır.



Şekil 43: Kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi.

4.1.5.14 X-ışını Kırınım Ölçer (XRD)

Kaplamaların faz analizlerinin yapılması ve kristal yapılarının belirlenmesi için RIGAKU SmartLab X-ışını kırınım difraktometresi kullanılmıştır.

4.1.6 Tezgahlar

Bu bölümde, iş parçasına delik açılmasında kullanılan kalıpcı freze tezgahı ile kesme performansı ve aşınma testlerinin yapıldığı diğ işleme merkezi hakkında bilgi verilmektedir.

4.1.6.1 Kalıpcı Freze Tezgahı

Kesme kuvveti ölçümlerinde iş parçalarının dinamometreye bağlantılarının yapabilmesi için iş parçaları üzerine kademeli delik delinmesi gerekmektedir. Bu amaçla karbür matkaplar temin edilerek Ti6Al4V alaşımı üzerine üçer adet kademeli delik delinmiştir (Şekil 44).



Şekil 44: Ti6Al4V alaşımı üzerinde kesme kuvveti ölçümleri için delik delinmesi işlemi.

4.1.6.2 Dik İşleme Merkezi

Kaplamalı ve kaplamasız karbür takımların kesme performansı ve aşınma davranışı testleri, 3 eksenli 10 kW gücünde bulunan Falco VMC 850-B CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Dik işleme merkezi ve deney düzeneğinin genel görüntüsü Şekil 45’de görülmektedir.



Şekil 45: Kesme testlerinde kullanılan deney sistemi.

4.2 Yöntem

4.2.1 Kaplamaların Biriktirilmesi

Kaplamaların, karbür kesici takımlardan ve disklerden oluşan altlıklar üzerine biriktirme işlemi iki aşamadan oluşmaktadır. 1-Altlıkların hazırlanması, 2-Kaplama işlemi.

4.2.1.1 Altlıkların Hazırlanması

Kaplamaların karakterizasyonunda kullanılmak üzere, disk şeklinde ($\varnothing 20 \times 4$ mm) WC/Co altlıklar temin edilmiştir. Ayrıca çubuk şeklindeki AISI D2 çeliği temin edilerek ($\varnothing 25$ mm)/4 mm kalınlığında kesilmiş ve disk şeklinde altlıklar oluşturulmuştur. AISI D2 ve karbür atlıklar kaplama öncesi yüzey hazırlama işlemine tabi tutulmuştur. Bunun için numuneler mekanik ve kimyasal olarak temizlenmişlerdir. Mekanik yüzey hazırlama işleminde, 120, 400, 800 ve 1200 mesh boyutlarında SiC kâğıt zımparalar ile taşlama işlemi keçe ile parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. 20 nm ortalama yüzey pürüzlülüğü elde edilinceye kadar parlatma işlemine devam edilmiştir. Kimyasal temizlik aşamasında ise, numuneler banyolarda farklı tip kimyasal deterjanlarla yıkanmış, suda durulanmış, sıcak temiz havada kurutulmuş ve manyetiklikleri alınmıştır (Şekil 46).



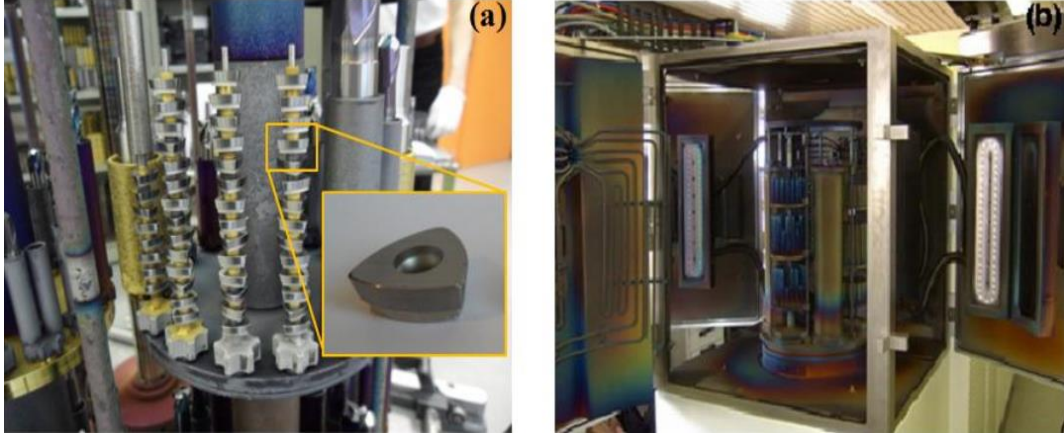
Şekil 46: AISI D2 soğuk iş takım çeliği altlıklar ve zımparalama işlemi.

4.2.1.2 Kaplama İşlemi

Altlıkların yüzey hazırlama işleminden sonra, kesici takımlar ve altlıklar döner tabla üzerindeki tutuculara yerleştirilmiştir. Takımların döner tabla üzerindeki pozisyonunu gösteren örnek fotoğraf Şekil 47’de verilmiştir.

Kaplama işlemlerinde, Ti ve TiAl hedefler kullanılmıştır. Altlıkların yerleştirildiği tutucular, 3 kez dönme kabiliyetine sahiptir. Kaplama işlemi için kullanılan endüstriyel kaplama ünitesinde (CC800/9 SinQ_x ML, CemeCon) biriktirme işlemi dört aşamadan oluşmaktadır:

- 1-Isıtma,
- 2-Ota frekanslı plazma dağlama,
- 3-Booesser dağlama,
- 4-Magnetron sıçratma.



Şekil 47:a) Kesici takımların döner tabla üzerindeki pozisyonu (Çalışkan, 2010).
b)Kaplama odasının açık görüntüsü (Panjan, 2010).

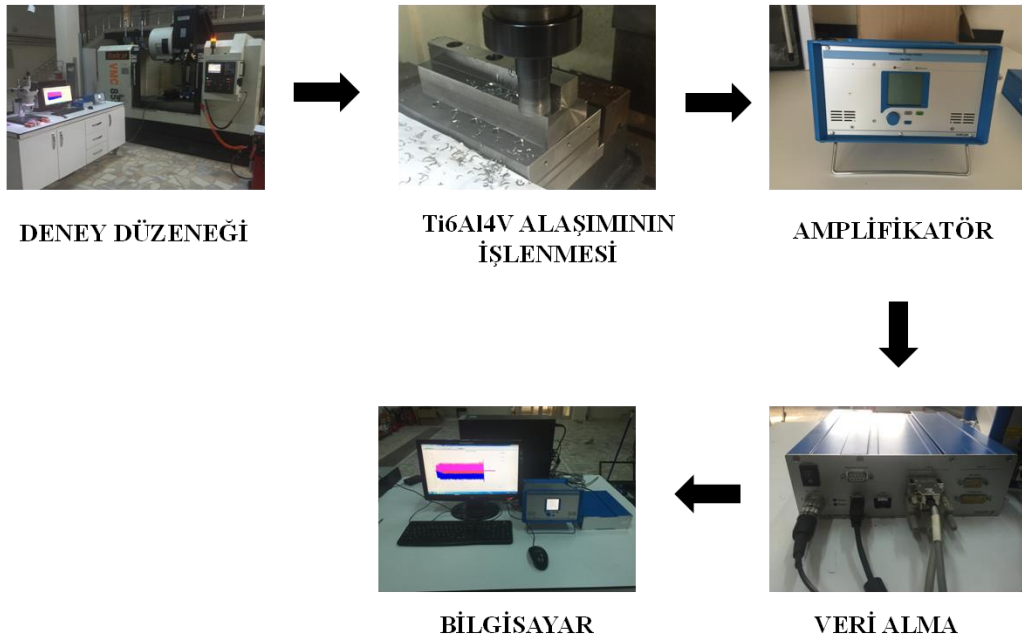
4.2.1.3 Kaplamaların Karakterizasyonu

Karakterizasyon işlemlerinde kullanılan cihazlar ve test parametreleri 4.1 Materyal bölümünde verilmiştir. Yapılan karakterizasyon işlemleri aşağıda özetlenmektedir:

Kaplamaların pürüzlülük değerleri profilometre ile ölçülmüştür. Bilye ile krater açma cihazı kullanılarak kaplama yüzeyine krater açılmış, eş odaklı mikroskop ile bu kraterlerin görüntüleri alınmış, boyutları ölçülmüş ve kaplama kalınlıkları hesaplanmıştır. Nanoindenter ile mikrosertlik ölçümü yapılmıştır. Ayrıca kaplamaların elastisite modülü ve deformasyon enerjileri belirlenmiştir. Altlık malzemeler üzerine kaplamaların adezyon değerleri CSM Revetest çizik testi cihazı ile ölçülmüştür. Testler sırasında, iz üzerinden görüntü alınmış, akustik emisyon değerleri ve teğetsel kuvvetler kaydedilmiştir. Kaplamaların sürtünme katsayılarının belirlenmesi amacıyla CSM tribometer kullanılarak 6 mm çapında Al_2O_3 bilye ile bilye-disk aşınma testleri yapılmıştır. Kaplama yapısını incelemek ve kaplamadaki mevcut elementleri belirlemek amacıyla, kaplanmış kesici takımların kırık kesitleri üzerinden SEM görüntüleri alınmış ve EDS analizleri yapılmıştır. İş parçasının mikrosertlik ölçümleri, WilsonWolpert Rockwell-C mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Kaplamaların faz analizlerinin yapılması ve kristal yapılarının belirlenmesi için XRD analizi yapılmıştır.

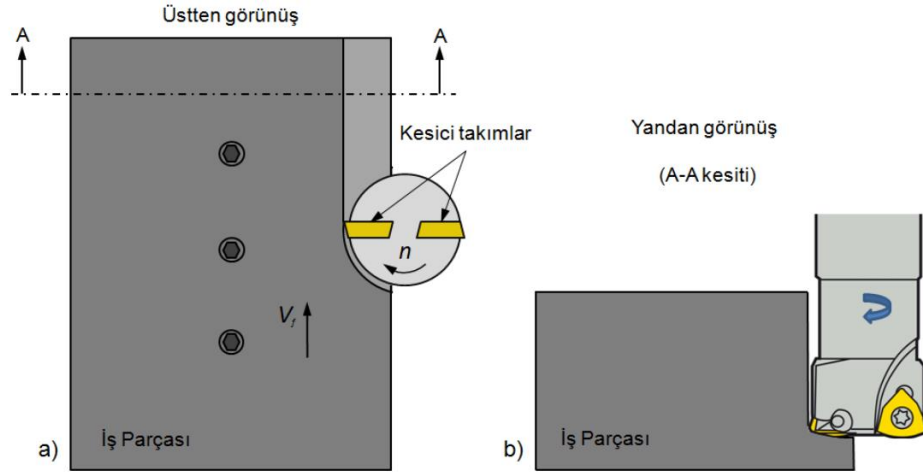
4.2.2 Kesme Performansı Testleri

Kaplamalı ve kaplamasız karbür takımların kesme kuvvetleri ve iş parçası yüzey pürüzlülüğüne olan etkisini incelemek amacıyla, kesme performansı testleri yapılmıştır. İş parçası bir dinamometrenin üzerine bağlanarak kesme kuvveti ölçümleri yapılmıştır (Şekil 48). Her kesme pasosu sırasında dinamometre yardımı ile elde edilen kesme kuvveti verileri, amplifikatör ve veri alma kartı yardımı ile bilgisayara kaydedilmiştir. Kesme testlerinde, iş parçası üzerinde elde edilen yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesinde uçlu tip yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır.



Şekil 48: Kesme performansı sırasında deney aşamasında yapılacak olan adımların genel görüntüsü.

Kesme performansı testlerinde uygulanan yüzey frezeleme işleminin üstten ve yandan görüntüsü Şekil 49’da verilmektedir. Kesme işlemi sırasında yapılan bütün testler, iş parçasının uzun kenarı üzerinde yapılmıştır.



Şekil 49: Kesme performans testlerinde yüzey frezeleme işleminin şematik görüntüsü (Çalışkan, 2012).

4.2.2.1 Kesme Parametrelerinin ve Deney Planının Belirlenmesi

Kesici takım-iş parçası malzemesi çiftinin çalışma bölgesini belirlemek amacıyla, yani performansları incelenecek olan karbür kesici takımların hangi kesme parametrelerinde test edileceğini belirlemek ve belirlenen kesme parametrelerinde aşınma davranışlarını incelemek amacıyla ön kesme deneyleri yapılmıştır. Ön kesme deneylerinde elde edilen takım aşınması sonuçları ve literatürde yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak, ayrıca kesici takım katalog verileri dikkate alınarak kesme parametreleri ve seviyeleri belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında, kesme performansı testlerinde 3 farklı kesme hızı, 3 farklı ilerleme ve bir kesme derinliği kullanılmıştır (Tablo 5). Kesme parametreleri etkileyen unsurlar ise kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğidir.

Tablo 5: Kesme parametreleri ve seviyeleri.

Parametreler	Seviyeler			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Kaplama	AlTiN/TiN	TiAlN	TiN	Kaplamasız
Kesme hızı [m/dak]	50	100	150	
İlerleme oranı [mm/diş]	0,05	0,1	0,15	
Eksenel kesme derinliği [mm]	0,5	0,5	0,5	

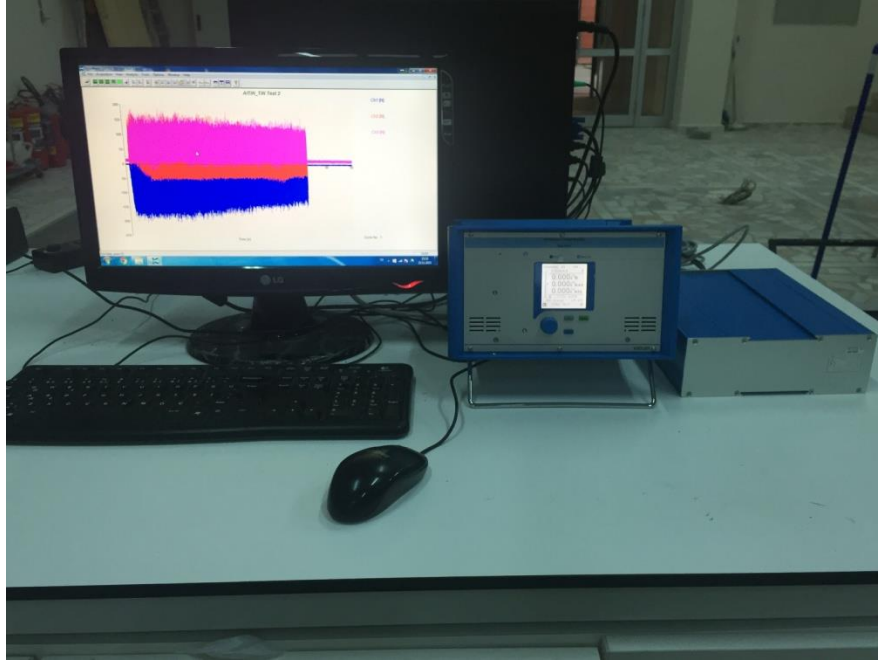
Kesme performansı testlerinde, her bir kaplama için 9 ayrı test yapılmıştır. Testleri ve kesme parametrelerinin değişimini gösteren deney deseni Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6: Kesme performansı testlerinde kullanılan deney deseni.

Test	Kaplama	V_c (m/dak)	f_z (mm/diş)	a_p (mm)
1	AlTiN/TiN	50	0,050	0,50
2	AlTiN/TiN	50	0,100	0,50
3	AlTiN/TiN	50	0,150	0,50
4	AlTiN/TiN	100	0,050	0,50
5	AlTiN/TiN	100	0,100	0,50
6	AlTiN/TiN	100	0,150	0,50
7	AlTiN/TiN	150	0,050	0,50
8	AlTiN/TiN	150	0,100	0,50
9	AlTiN/TiN	150	0,150	0,50
10	TiAlN	50	0,050	0,50
11	TiAlN	50	0,100	0,50
12	TiAlN	50	0,150	0,50
13	TiAlN	100	0,050	0,50
14	TiAlN	100	0,100	0,50
15	TiAlN	100	0,150	0,50
16	TiAlN	150	0,050	0,50
17	TiAlN	150	0,100	0,50
18	TiAlN	150	0,150	0,50
19	TiN	50	0,050	0,50
20	TiN	50	0,100	0,50
21	TiN	50	0,150	0,50
22	TiN	100	0,050	0,50
23	TiN	100	0,100	0,50
24	TiN	100	0,150	0,50
25	TiN	150	0,050	0,50
26	TiN	150	0,100	0,50
27	TiN	150	0,150	0,50
28	Kaplamasız	50	0,050	0,50
29	Kaplamasız	50	0,100	0,50
30	Kaplamasız	50	0,150	0,50
31	Kaplamasız	100	0,050	0,50
32	Kaplamasız	100	0,100	0,50
33	Kaplamasız	100	0,150	0,50
34	Kaplamasız	150	0,050	0,50
35	Kaplamasız	150	0,100	0,50
36	Kaplamasız	150	0,150	0,50

4.2.2.2 Kesme Kuvveti Ölçümleri

Ti6Al4V iş parçasının yüzey frezeleme işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin ölçümü için dinamometre ve amplifikatörden faydalanılmıştır. Kesme testleri sırasında, iş parçasının sadece 75 mm kesme uzunluğu boyunca elde edilen kuvvetler kaydedilmiştir. Testlerde, “Kistler 9257B” dinamometre kullanılarak tezgâhın x, y ve z eksenleri doğrultusunda meydana gelen F_x , F_y ve F_z kesme kuvveti bileşenleri ölçülmüştür. Bu dinamometre “Kistler 5070” bir sinyal yükselticiye (Multichannel Charge Amplifier) bağlanarak, kesme kuvvetleri ara kabloyla bilgisayara gönderilip, “Dyno Ware” programı ile grafikler halinde elde edilmiştir (Şekil 50).

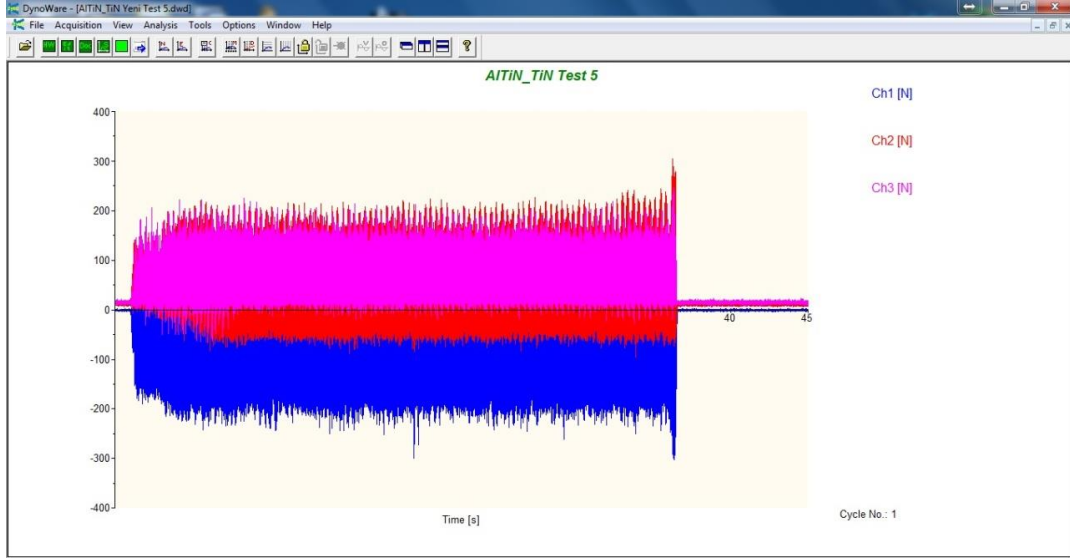


Şekil50: Dyno Ware programı ile kesme kuvvetlerinin ölçülmesi sırasında bir görüntü.

Elde edilen kesme kuvveti bileşenleri kullanılarak bileşke kesme kuvveti (F_R) hesaplanmıştır (Eşitlik 2).

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (2)$$

Tabla hızına bağılı olarak, her bir test için farklı sürelerde kesme kuvveti sinyali alınmıştır. Alınan sinyaller kaydedilerek amplifikatör sıfırlanmıştır. Elde edilen bir kesme kuvveti sinyalinin görüntüsü Şekil 51’de verilmektedir.



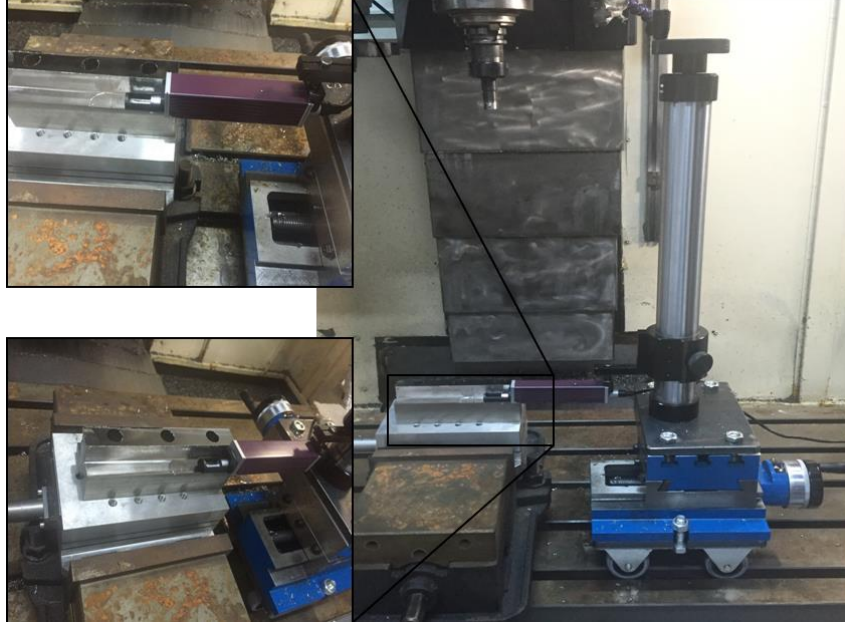
Şekil 51: Kesme kuvveti sinyal görüntüsü.

Kesme testlerinde kesici takımların parçaya girdiği ve çıktığı anlarda kesme kuvvetinde dalgalanmalar meydana geldiğinden dolayı, takım tutucu iş parçasına tam olarak girdikten sonra elde edilen kesme kuvveti değerleri analiz için kullanılmıştır. Her bir kesme kuvveti bileşeni için sinyallerdeki piklerin maksimum değerlerinin ortalaması alınarak kesme kuvveti sonucu olarak kaydedilmiştir.

4.2.2.3 İş Parçası Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Ölçülmesi

Kesme testlerinde, frezeleme işlemi sırasında iş parçası üzerinde elde edilen yüzey pürüzlülüğün ölçülmesinde Mitutoyo Surftest SJ-310 uçlu tip yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihaz ve cihazın iş parçası üzerindeki kullanımı Şekil 52’de gösterilmektedir. Elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri $0,1 < R_a \leq 2$ olduğundan dolayı, ölçümler sırasında yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı üzerinde örnekleme uzunluğu 0,8 mm ve ölçme sayısı 5 olarak ayarlanmıştır. Kesme işleminden sonra iş parçası üzerindeki talaşlar hava ile temizlenmiştir. Pürüzlülük ölçüm cihazı işlenmiş yüzey üzerine

yerleştirilmiş ve kesme uzunluğu boyunca farklı yerlerden alınan en az üç ardışık ölçümün ortalaması yüzey pürüzlülüğü değeri olarak kaydedilmiştir.



Şekil 52: Yüzey pürüzlülük cihazının kullanımı.

4.2.3 Aşınma Testleri

Kesme performans testleri sonrasında, farklı kesme hızlarında, sabit ilerleme değeri ve kesme derinliğinde, kaplamalı ve kaplamasız karbür kesici takımların ömürleri karşılaştırılmış, aşınma davranışları incelenmiştir. Aşınma testlerinde kullanılan kesme parametreleri Tablo 7’ de verilmektedir.

Tablo 7: Aşınma testlerinde kullanılan kesme parametreleri.

Deney no	İlerleme miktarı, f_z (mm/diş)	Talaş derinliği, a_p (mm)	Kesme hızı, V_c (m/dak)
1	0,1	1	50
2			100

Kesme performans testlerinden farklı olarak, aşınma testlerinde 1 paso uzunluğu, iş parçası uzunluğunun tamamı (150 cm) olarak belirlenmiştir. Buradaki amaç, kesme testlerinde kesici takımların iş parçasına ilk kez girerken ve son çıkarken karşılaştıkları darbeli ve düzensiz kesme şartlarını azaltmak ve kesici takımlarda bu şartlardan kaynaklanabilecek hasarları önlemektir. Testlerde eksenel kesme derinliği (a_p) 1 mm, radyal kesme derinliği (a_e) 15 mm ve ilerleme değeri 0,1 mm/diş olarak sabit tutulmuş olup, deneyler kuru ortamda gerçekleştirilmiştir.

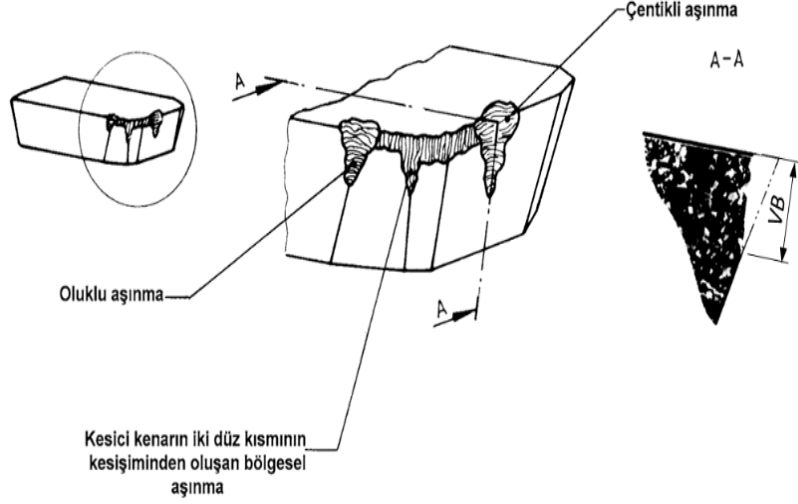
4.2.3.1 Takım Aşınmasının Ölçülmesi

Ti6Al4V alaşımı üzerinde kaplamalı ve kaplamasız karbür takımlar ile farklı parametrelerde gerçekleştirilen takım aşınması testlerinde, 1-5 arası paso kesme işleminden sonra kesici takımlar takım tutucudan sökülerek stereo zoom mikroskopta aşınma bölgesinin fotoğrafı çekilmiş ve miktarı ölçülmüştür. Mikroskop ve aşınma ölçüm işleminin genel görüntüsü Şekil 53’de verilmektedir. Kesici takımın serbest yüzeyindeki ve talaş yüzeyindeki aşınmalar ölçülürken, yüzeyler, mikroskop tablasının yüzeyine paralel tutulmuştur. Ayrıca, aşınmış kesici takımlar üzerinde SEM ve EDS analizleri yapılarak meydana gelen aşınma tipleri ve mekanizmaları ortaya konulmuştur.



Şekil 53: Takım aşınmasının ölçümü.

Ti6Al4V alaşıımı üzerinde kaplamalı ve kaplamasız karbür takımların aşınma testlerinde ISO 8688-1 standardına göre yüzeyde daha çok çektik aşınma meydana geldiği gözlenmiştir. Çentikli aşınmanın büyüklüğünü belirlemek için, standartta belirtildiği şekilde aşınma derinliği (VB_N) ölçülmüştür (Şekil 54) .



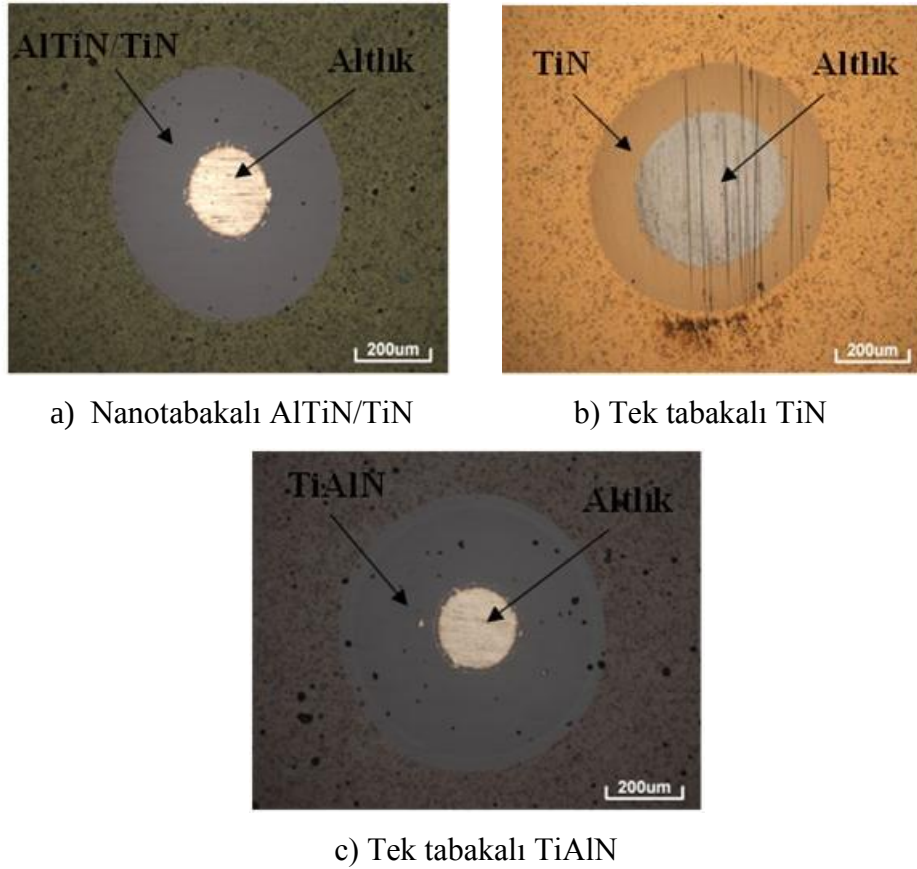
Şekil 54: Bölgesel serbest yüzey aşınmaları ve çentikli aşınmanın ölçümü (ISO 8688-1, 1989).

BÖLÜM 5

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

5.1 Kaplamaların Karakterizasyonu

Bu bölümde AISI D2 altlık malzemeler üzerine, magnetron sıçratma ile fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile biriktirilen nanotabakalı AlTiN/TiN, tek tabakalı TiN, tek tabakalı TiAlN kaplamalar üzerinde bilye ile krater açma (Kalotest) cihazı kullanılarak, elde edilen kraterlerin eş odaklı mikroskop ile elde edilmiş görüntüleri Şekil 55’de verilmektedir.



Şekil 55: Kaplamalar üzerinde oluşturulan krater izleri.

Kalotest cihazı ile kaplamaların yüzeyleri üzerinde elde edilen kraterlerin resimleri çekildikten sonra ilgili Eşitlik 1’den faydalanılarak kalınlıkları hesaplanmıştır. Hesaplanan

kaplama kalınlıkları Tablo 8’de verilmektedir. Tek tabakalı TiAlN kaplama kalınlığı en fazla, tek tabakalı TiN ise kaplama kalınlığı en düşük değere sahiptir.

$$d_k = \frac{x.y}{D_b} \quad (1)$$

Tablo 8: AISI D2 altlıklar üzerine biriktirilen kaplamaların kalınlık değerleri.

Kaplama	Kalınlık[μm]
Nanotabakalı AlTiN/TiN	4,2
Tek tabakalı TiAlN	5,7
Tek tabakalı TiN	3,3

5.1.1 Mekanik Özellikler

5.1.1.1 Sertlik Ölçümü Bulguları

Kaplamalar üzerinde gerçekleştirilen nanoindentasyon testleri sonucunda elde edilen mikrosertlik değerleri Tablo 9’da verilmektedir. İnce filmlerin sertlik ölçümlerinde maksimum indentasyon derinliğinin, kaplama kalınlığının 1/10’unu aşmaması gerekmektedir. Ölçümlerde kaydedilen maksimum indentasyon derinliği 0,29 μm’nin altında olduğundan dolayı, elde edilen sertlik değerleri, kaplamaların sertliklerini göstermektedir. Ancak, tek tabakalı TiAlN kaplamanın sertlik değeri beklenenin çok üstündedir.

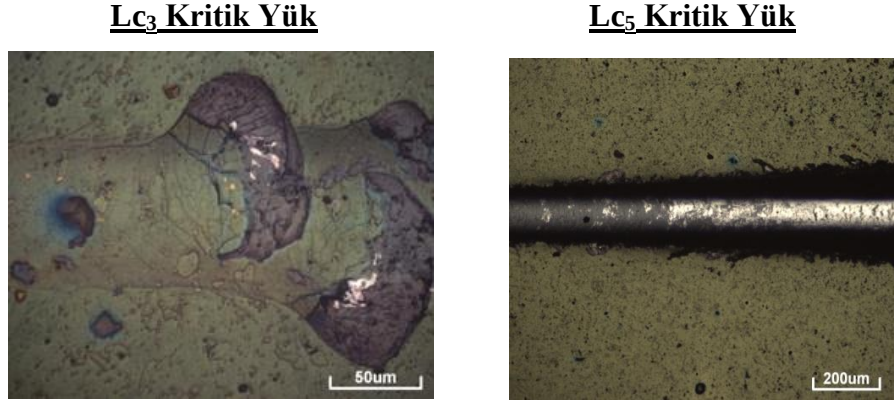
Tablo 9: Biriktirilen kaplamaların sertlikleri.

Kaplama	Sertlik, H [HV]	Elastisite modülü, E [GPa]	H/E^*	H^3/E^{*2} [GPa]
Tek tabakalı TiN	3044	365	0,08	0,20
Tek tabakalı TiAlN	4969	420	0,12	0,66
Nano tabakalı AlTiN/TiN	3417	372	0,09	0,27

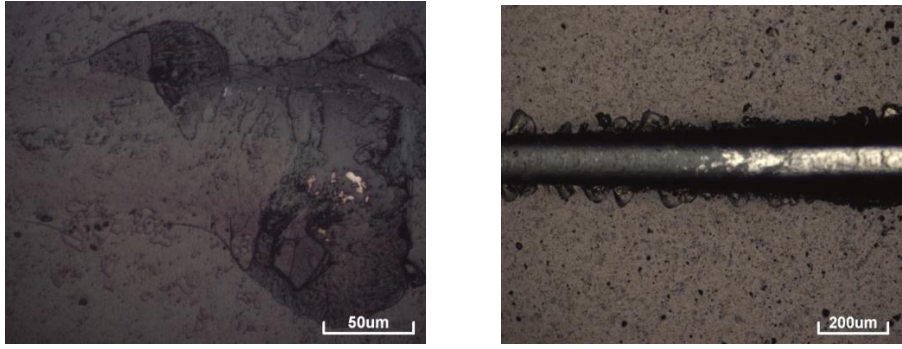
Kaplamaların plastik deformasyon direncini gösteren H/E^* ve H^3/E^{*2} oranlarına göre (Tsui vd. 1995), en dirençli kaplamanın tek tabakalı TiAlN ve sonrasında nanotabakalı AlTiN/TiN olduğu görülmüştür.

5.1.1.2 Adezyon Ölçümü Bulguları

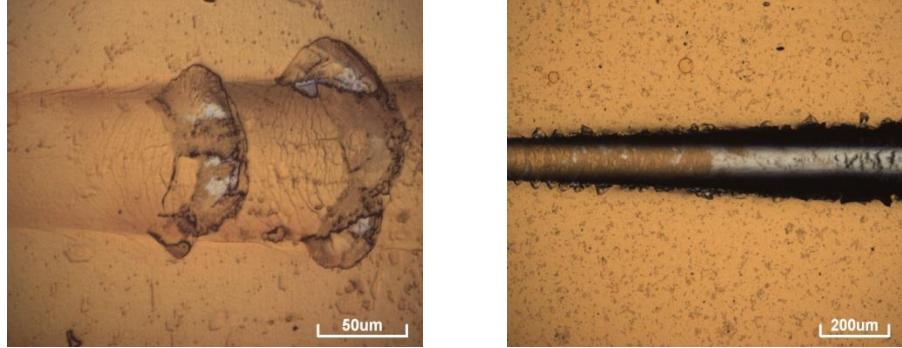
Kaplamaların, AISI D2 çelik altlıklara adezyonunun ölçülmesi için CSM Revetest çizik test cihazı kullanılmıştır. Testlerde, kaplamalarda dökülmelerin başladığı kritik yük değeri Lc_3 , tamamen delaminasyonun başladığı kritik yük değeri ise Lc_5 olarak isimlendirilmektedir. Çizikler üzerinde Lc_3 ve Lc_5 değerinin elde edildiği bölgenin eş odaklı mikroskop ile çekilen resimleri Şekil 56'da verilmektedir. Kaplamaların hepsinde, hasar mekanizması açılmal çatlak oluşumu ile başlamakta ve sonrasında dökülme (spalling) meydana gelmektedir.



(a)Nanotabakalı AlTiN/TiN resimleri.



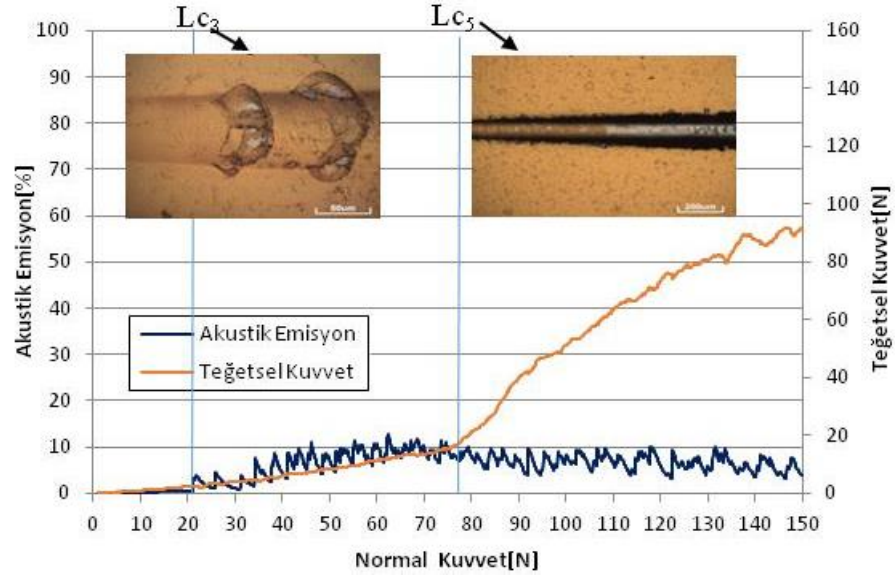
(b)Tek tabakalı TiAlN resimleri.



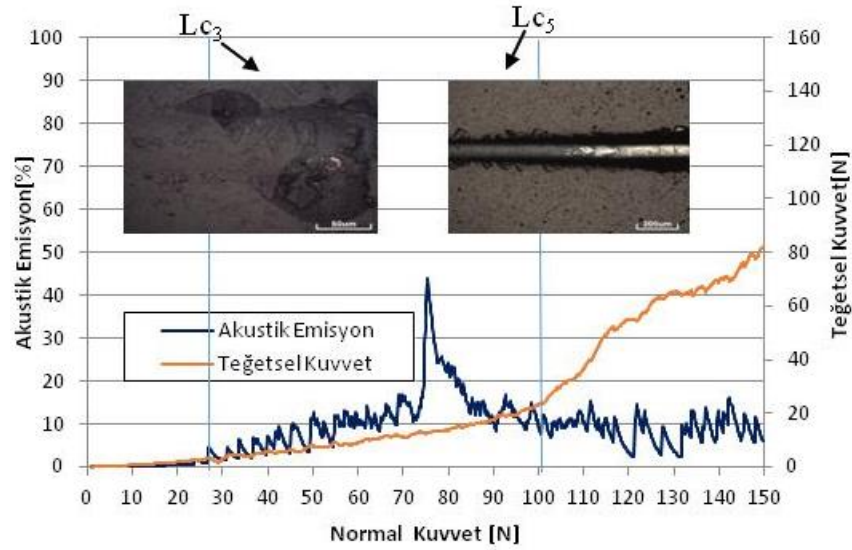
(c)Tek tabakalı TiN resimleri.

Şekil 56: Çizikler üzerinde Lc₃ ve Lc₅ kritik yükünün elde edildiği bölgelerin resimleri.

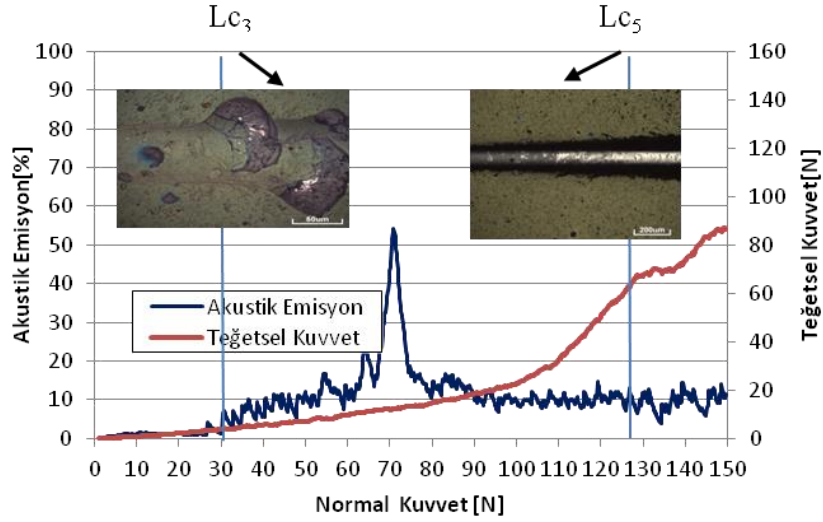
Şekil 57-59'de çizik testlerinde, normal kuvvetin değişimine bağlı olarak akustik emisyon (AE) ve teğetsel kuvvet (F_t) değerlerinin değişimi görülmektedir. Tek tabakalı TiN kaplamanın Lc₃ ve Lc₅ kritik değerleri (22 N ve 78 N) olarak elde edilmiştir (Şekil 57). Tek tabakalı TiAlN kaplamanın Lc₃ ve Lc₅ kritik değerleri (25 N ve 102 N) olarak elde edilmiştir (Şekil 58). Nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamanın Lc₃ ve Lc₅ kritik değerleri ise (26 N ve 108 N) olarak elde edilmiştir (Şekil 59).



Şekil 57: Tek tabakalı TiN kaplama üzerinde gerçekleştirilen çizik testinde normal yüke bağlı olarak AE ve Fz değerlerinin değişimi.

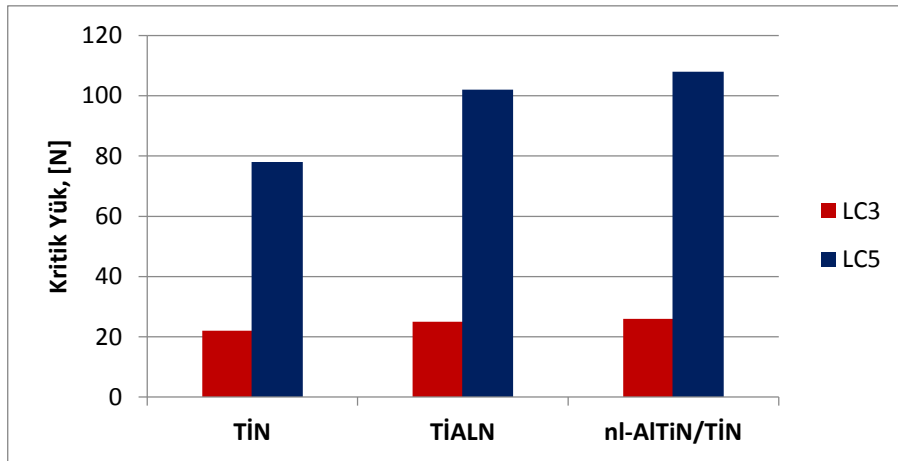


Şekil 58: Tek tabakalı TiAlN kaplama üzerinde gerçekleştirilen çizik testinde normal yüke bağlı olarak AE ve Fz değerlerinin değişimi.



Şekil 59: Nanotabakalı AlTiN/TiN kaplama üzerinde gerçekleştirilen çizik testinde normal yüke bağlı olarak AE ve Fz değerlerinin değişimi.

Her bir kaplama üzerinde yapılan çizik testlerinde elde edilen kritik yüklerin ortalama değerlerinin karşılaştırılması Şekil 60’da gösterilmektedir. Nanotabakalı AlTiN/TiN kaplama, bütün kritik yük değerlerinde AISI D2 altlık malzemesine adezyonda üstünlük göstermektedir. En düşük adezyon ise tek tabakalı TiN kaplamalar ile elde edilmektedir.

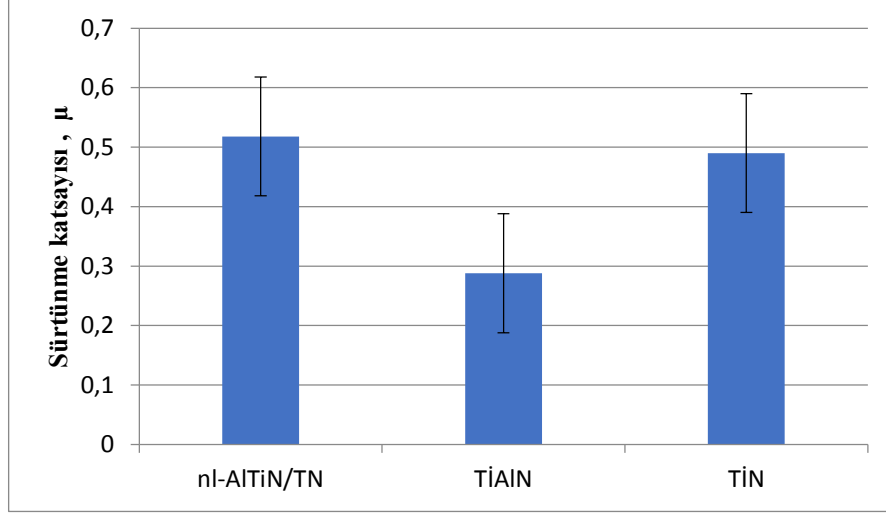


Şekil 60: Kaplamaların adezyonlarının karşılaştırılması.

5.1.1.3 Sürtünme Katsayısı Ölçüm Bulguları

Sürtünme katsayısı ölçümleri için CSM Tribometer kullanılmıştır. Kaplamalar üzerinde elde edilen sürtünme katsayıları Şekil 61’de verilmektedir. En düşük sürtünme katsayısı

TiAlN kaplama ile elde edilmiştir. En yüksek sürtünme katsayısını ise nanotabakalı AlTiN/TiN kaplama vermiştir.



Şekil 61: Biriktirilen kaplamaların sürtünme katsayıları.

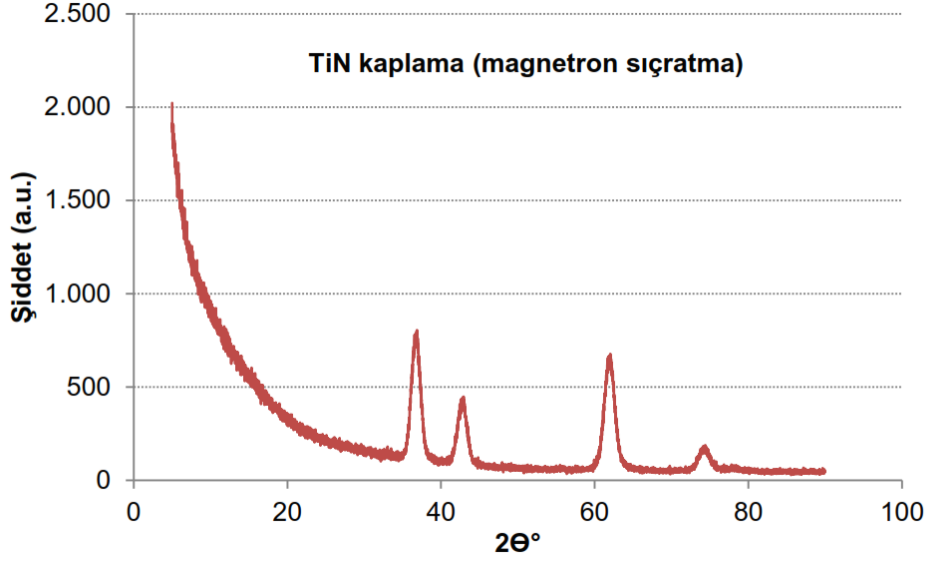
5.1.1.4 Yüzey Pürüzlülüğü

AISI D2 çelik altlıklar üzerine biriktirilen kaplamaların pürüzlülükleri, kaplamalar üzerinde yapılan pürüzlülük ölçümlerinin sonuçları Tablo 10'da verilmektedir. Tek tabakalı TiN kaplamaların en düşük pürüzlülük değerine sahip olduğu görülmektedir.

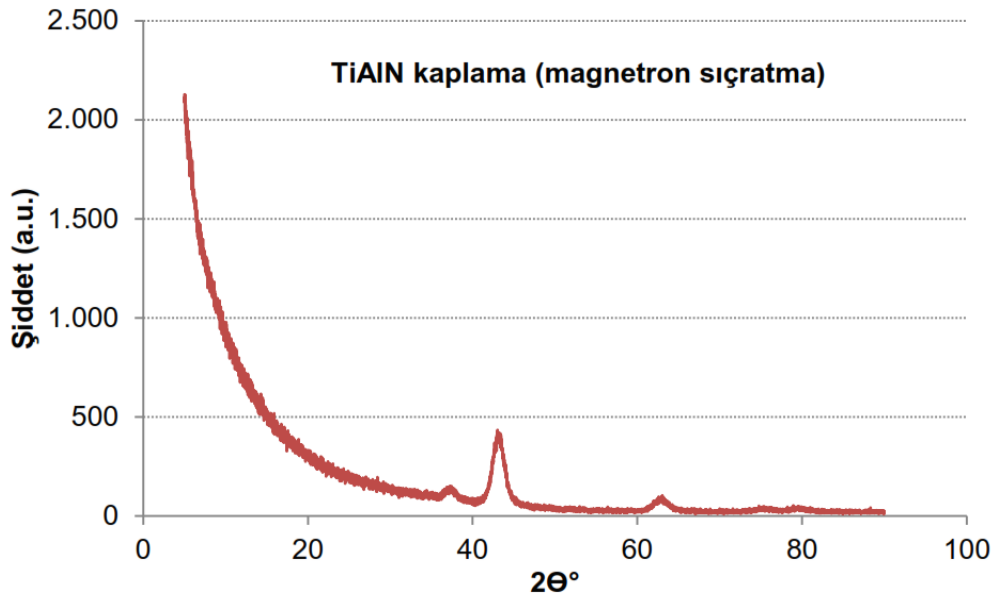
Tablo 10: AISI D2 altlıklar üzerine biriktirilen kaplamaların pürüzlülük değerleri.

Kaplama	Pürüzlülük, Ra [μm]
Nanotabakalı AlTiN/TiN	0,077
Tek tabakalı TiAlN	0,111
Tek tabakalı TiN	0,042

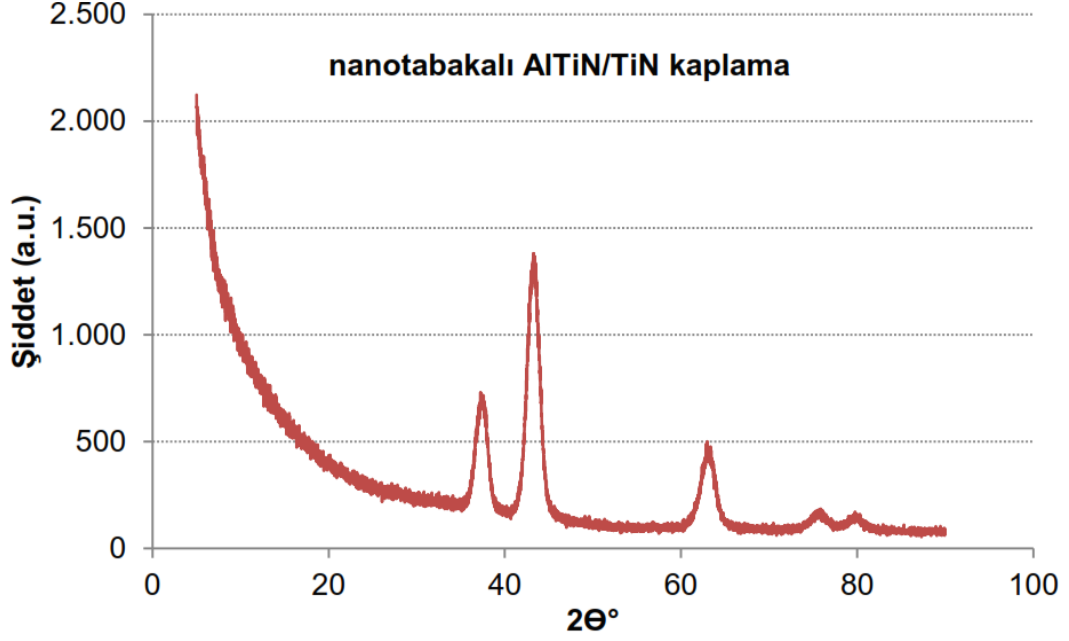
incelendiğinde kaplamanın daha keskin kübik TiN pikleri verdiği görülmektedir. Şekil 64 incelendiğinde, TiAlN kaplamalarda kübik (Ti_{0,44}Al)N yapısı görülmüştür. Nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamada da, kübik (Ti_{0,44}Al_{0,56})N yapısı görülmüştür (Şekil 65).



Şekil 63: TiN kaplamanın X-ışını kırınım deseni.



Şekil 64: TiAlN kaplamanın X-ışını kırınım deseni.



Şekil 65: Nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamanın X-ışını kırınım deseni.

5.2 Kesme Performansı Testleri

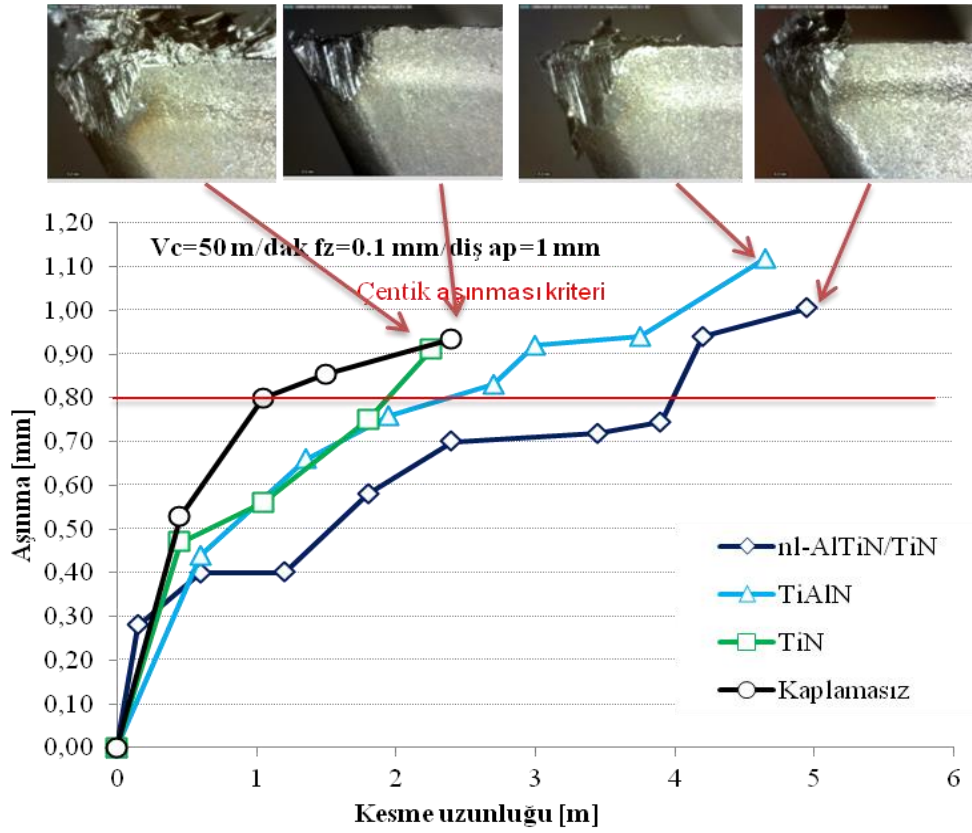
5.2.1 Takım Aşınması Testleri

5.2.1.1 Takım Ömrü

Nanotabakalı AlTiN/TiN, tek tabakalı TiAlN, tek tabakalı TiN kaplamalı ve kaplamasız karbür kesici takımlar kullanılarak Ti6Al4V alaşımı üzerinde gerçekleştirilen frezeleme testlerinde, takımlarda çentik aşınması meydana geldiği gözlenmiştir. Takım ömrünün belirlenmesinde 0,80 mm çentikli aşınma derinliği, takım ömrü kriteri olarak belirlenmiştir (TS ISO 86881, 1989). 0,80 mm çentikli aşınma derinliğine ulaşıldığı zaman takımlar aşınmış kabul edilmiştir.

50 m/dak kesme hızı, 0,1 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm eksenel kesme derinliği değerinde gerçekleştirilen aşınma testlerinde, kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarda meydana gelen çentikli aşınmanın, kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi Şekil 66'da gösterilmektedir. Aşınma kriteri 0,80 mm çentik aşınma derinliğine ulaşıncaya kadar en

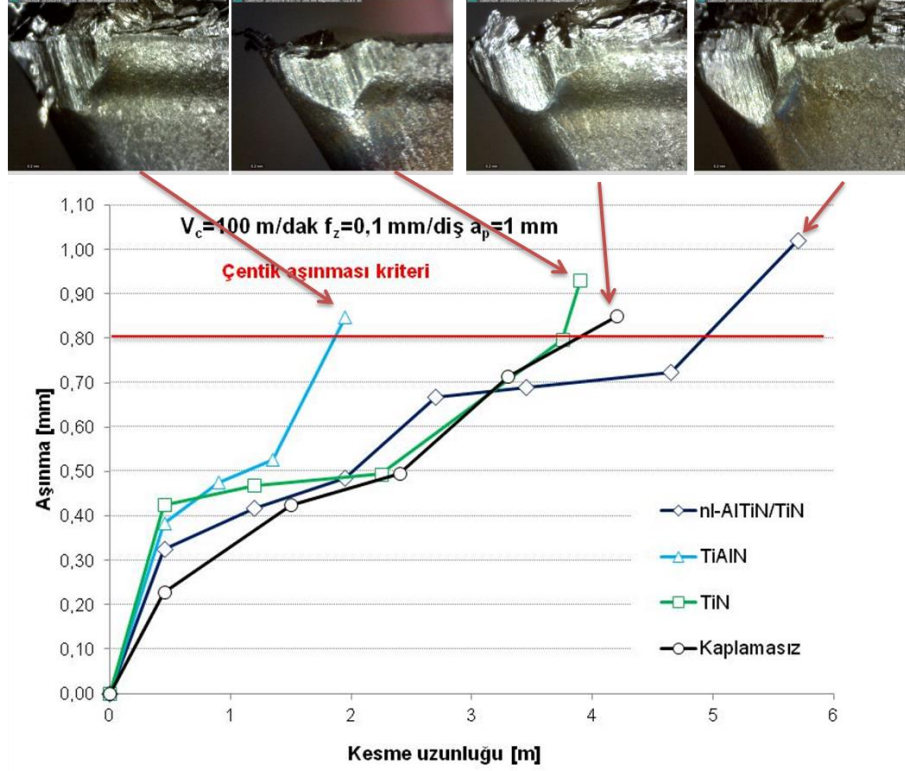
uzun takım ömrü 4,0 m kesme uzunluğu ile nanotabakalı AlTiN/TN kaplamalı kesici takımlar ile elde edilmiştir. 1,8 m kesme uzunluğuna kadar nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı takımlar, sahip oldukları yüksek adezyon ve aşınma direnci sayesinde TiN ve TiAlN kaplamalı kesici takımlardan daha düşük çentikli aşınma göstermiştir. Son iki pasoda nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamaların tamamen aşınması dolayısıyla karbür kesici takım iş parçasıyla temasa geçmiş ve çentikli aşınma hızla artmıştır. Kesici takım ömürleri karşılaştırıldığında en uzun takım ömrü nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı takım, en düşük takım ömrü ise kaplamasız takımlarda elde edilmiştir.



Şekil 66: 50 m/dak kesme hızında Ti6Al4V alaşımının frezelenmesinde kesici takım aşınma miktarının kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi.

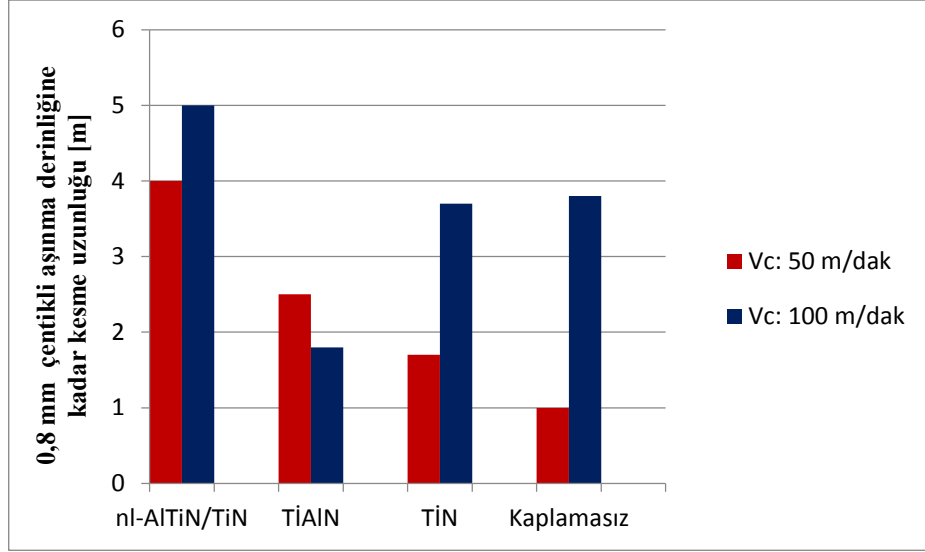
100 m/dak kesme hızı, 0,1 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm eksenel kesme derinliğinde gerçekleştirilen aşınma testlerinde, kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarda meydana gelen çentikli aşınmanın kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi Şekil 67’de gösterilmektedir. Aşınma kriteri 0,80 mm çentikli aşınma derinliğine ulaşıncaya kadar en uzun takım ömrü 5,0 m kesme uzunluğu ile nanotabakalı AlTiN/TN kaplamalı kesici

takımlar ile elde edilmiştir. Son iki pasoda nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamaların tamamen aşınması sonucunda, karbür kesici takım iş parçasıyla temasa geçmiş ve çentikli aşınma hızla artmıştır. Kesici takım ömürleri karşılaştırıldığında en düşük takım ömrü TiAlN kaplamalı takımlar ile elde edilmiştir.



Şekil 67: 100 m/dak kesme hızında Ti6Al4V alaşımının frezelenmesinde kesici takım aşınma miktarının kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi.

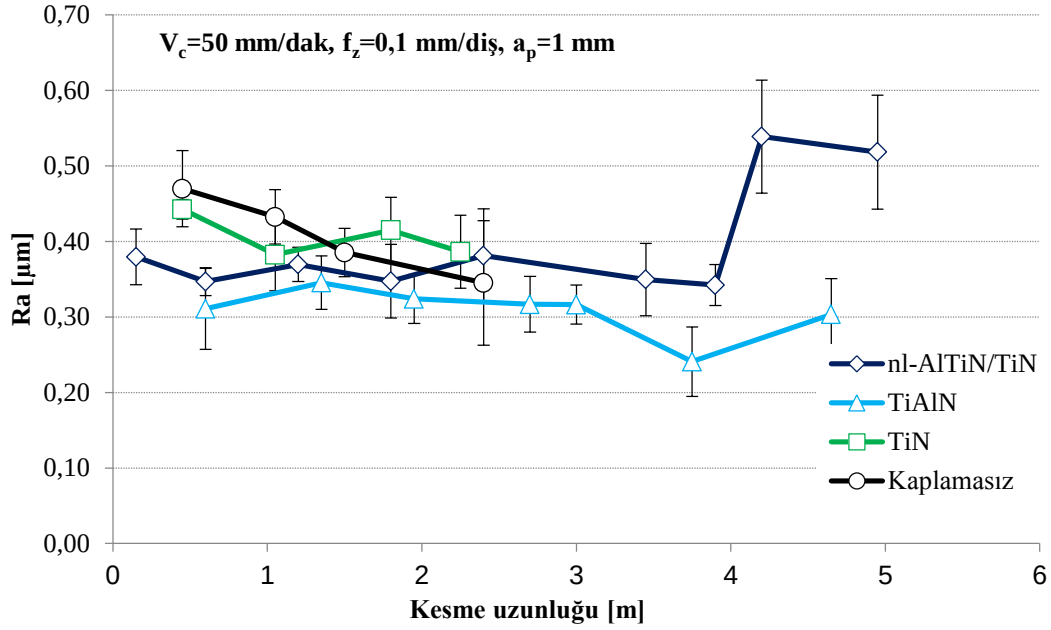
Kaplamalı ve kaplamasız takımlar ile karşılaştırıldığında (Şekil 68), 0,8 mm çentikli aşınma derinliğine kadar en uzun takım ömürleri TiAlN kaplamalı takımlar hariç, 100 m/dak kesme hızı, 0,1 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme derinliğine sahip kesme parametrelerinde elde edilmiştir. Kaplamalı takımlar arasında da en uzun takım ömrü nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı karbür kesici takımlar ile elde edilmiştir. En az takım ömrü ise, 50 m/dak kesme hızı, 0,1 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme derinliğinde kaplamasız takımlar ile elde edilmiştir. Nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı karbür kesici takımlar, 50 m/dak kesme hızında, TiAlN, TiN kaplamalı ve kaplamasız takımlardan sırasıyla 1,6, 2,2 ve 4,0 kat daha uzun takım ömrü vermiştir. 100 m/dak kesme hızında ise bu oranlar 2,7, 1,3 ve 1,2 olarak elde edilmiştir.



Şekil 68: Farklı kesme hızlarında, 0,1 mm/diş ilerleme ve 1 mm kesme derinliği oranlarında kaplamalı ve kaplamasız takımlar ile 0,8 mm çentikli aşınma derinliğine kadar elde edilen kesme uzunlukları.

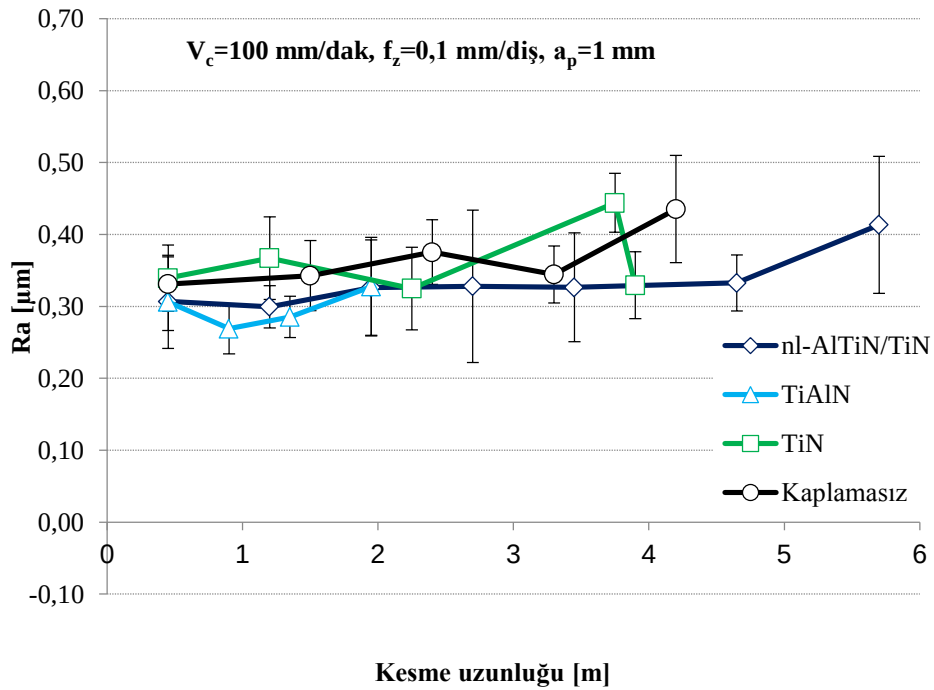
5.2.1.2 Yüzey Pürüzlülüğü

Nanotabakalı AlTiN/TiN, tek tabakalı TiAlN, tek tabakalı TiN kaplamalı ve kaplamasız karbür kesici takımlar ile Ti6Al4V alaşımı üzerinde gerçekleştirilen yüzey frezeleme testlerinde, belirli kesme mesafelerinde iş parçasının yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. 50 m/dak kesme hızında iş parçası üzerinde elde edilen yüzey pürüzlülüğünün, kesme mesafesine bağlı olarak değişimi Şekil 69’da gösterilmektedir. Nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı takımlar ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri 4 m kesme uzunluğuna kadar benzer olup, bu noktadan sonra aşınmayla birlikte artış göstermiştir. İlk pasodaki yüzey pürüzlülük değerleri karşılaştırıldığında, en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri TiAlN kaplamalı kesici takımlar ile elde edilmiştir. Bunun sebebi, TiAlN kaplamalı kesici takımın kesici kenarının aşınarak burun yarıçapının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kaplamasız ve TiN kaplamalı kesici takımlar ile elde edilen pürüzlük değerleri ilk pasoya göre azalma göstermektedir. Bununda, aşınmayla birlikte artan burun yarıçapından kaynaklandığı düşünülmektedir. TiAlN kaplamalı kesici takımlar ile ilk ve son pasoda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri yaklaşık olarak aynıdır. Nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımlar aşınmış takımlar arasında en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerini vermişlerdir.



Şekil 69: 50 m/dak kesme hızında iş parçası yüzey pürüzlülüğünün kesme mesafesine bağlı olarak değişimi.

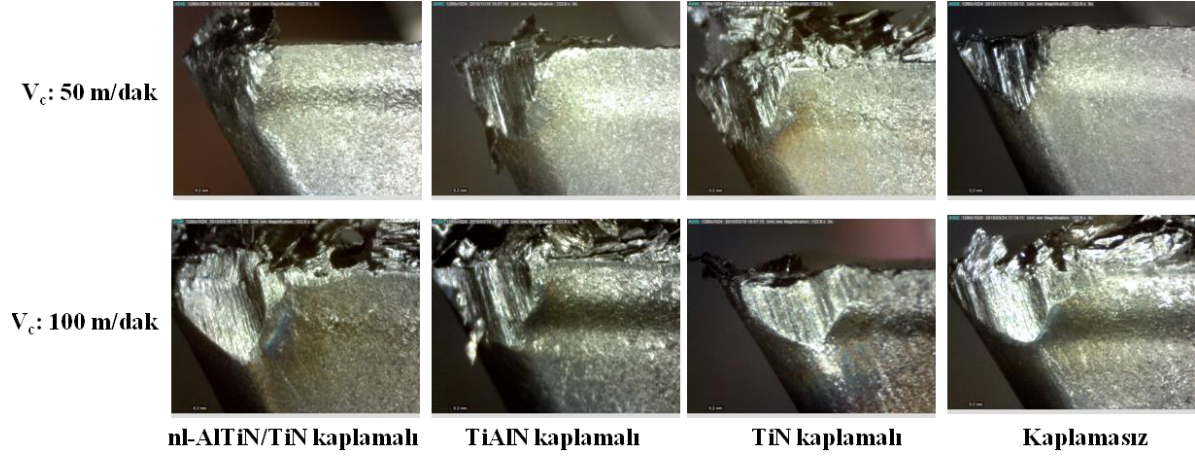
100 m/dak kesme hızında gerçekleştirilen yüzey frezeleme testlerinde yüzey pürüzlülük değerleri karşılaştırıldığında bütün takımlar benzer sonuç vermiştir (Şekil 70). İş parçası yüzey pürüzlülüğü 0,25-0,40 μm aralığında ölçülmüştür. Aşınma ile birlikte yüzey pürüzlülüğü artış göstermiştir.



Şekil 70: 100 m/dak kesme hızında iş parçası yüzey pürüzlülüğünün kesme mesafesine bağlı olarak değişimi.

5.2.1.3 Aşınma Mekanizmaları

İki farklı kesme hızında Ti6Al4V alaşımı üzerinde gerçekleştirilen frezeleme testlerinde aşınan takımların stereo zoom mikroskop görüntüleri Şekil 71’de verilmiştir. Bu görüntülerden, takımlarda meydana gelen çentikli aşınma ve kesici kenara yapışan talaşlar açık bir şekilde görülebilmektedir.

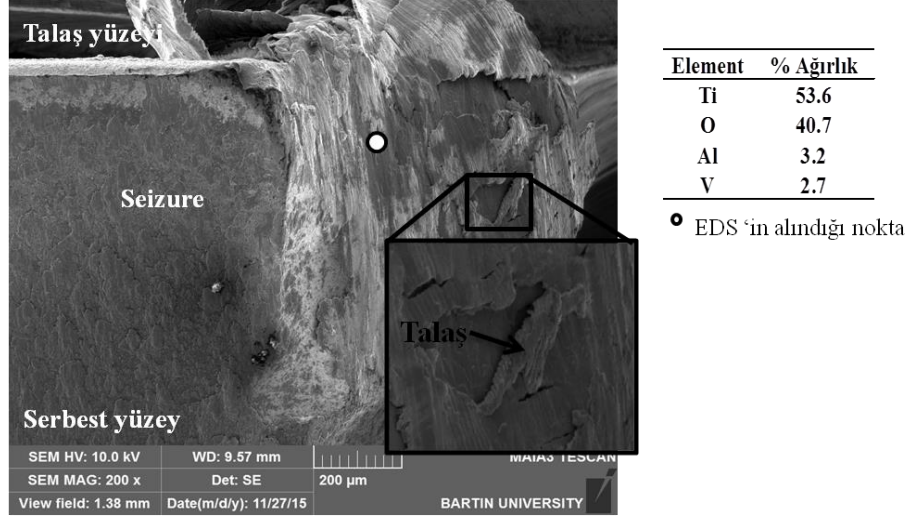


Şekil 71: Farklı kesme hızlarında Ti6Al4V alaşımının frezelenmesinde aşınmış takımların stereo zoom mikroskop görüntüleri.

Ti6Al4V alaşımı üzerinde iki farklı kesme hızında 0,1 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm eksenel kesme derinliğinde gerçekleştirilen frezeleme testlerinde, Şekil 72’de verilmektedir. Aşınmış nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı takımların, esas olarak adeziv ve daha sonra abraziv aşınmaya maruz kaldığı görülmektedir. Takımların serbest yüzeylerinde talaş yapışması bölgeleri (seizure zone) oluşmuştur ve bu oluşum kesme hızı ile birlikte artmaktadır. Ayrıca, yüksek kesme hızında çentik bölgesinde kırılma meydana gelmiştir. Aşınma bölgesinde oksidasyonun meydana geldiği ve bunun da kesme hızı ile birlikte arttığı yapılan EDS analizleri sonucunda doğrulanmıştır.

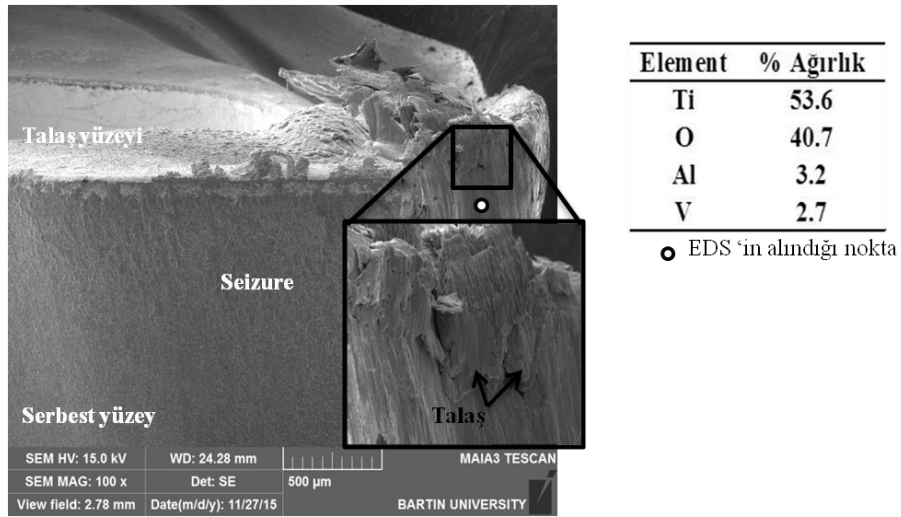
Aşınma testlerinde, baskın aşınma mekanizmaları abraziv aşınma ve oksidasyon aşınması olarak gözlenmiştir. Ana aşınma tipleri ise çentikli aşınma ve yığıntı talaş oluşumudur. Aşınmış nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 72’de verilmektedir. Karbür altlık ve talaşlar oksidasyona maruz kalmıştır ve bu durum elementel analiz ile doğrulanmıştır. Kaplama aşındıktan sonra iş parçası

malzemesinin kesici kenar üzerine adezyonu gözlenmiştir. Oksidasyon ve abrazyon aşınma sonucunda çentikli aşınma meydana gelmiştir (Childs vd. 2000).



Şekil 72: V_c : 50 m/dak, f_z : 0,1 mm/diş, a_p : 1 mm kesme parametrelerinde aşınmış nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi.

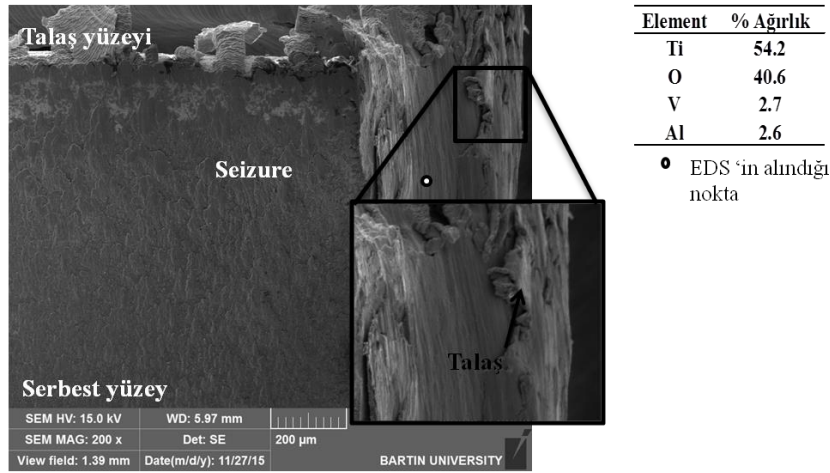
Diğer kesici takımlar ile gerçekleştirilen frezeleme testlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Diğer takımlarla SEM görüntüleri ve EDS analizleri Şekil 73-79'da verilmiştir.



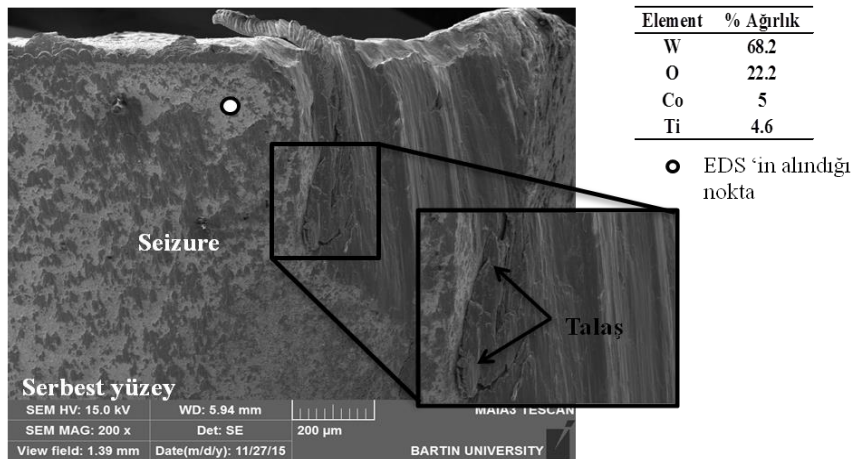
Şekil 73: V_c : 50 m/dak, f_z : 0,1 mm/diş, a_p : 1 mm kesme parametrelerinde aşınmış TiAlN kaplamalı kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi.

Aşınma testlerinde, baskın aşınma mekanizmaları abrazyon aşınma ve oksidasyon aşınması olarak gözlenmiştir. Ana aşınma tipleri ise çentikli aşınma ve yığılma oluşumudur.

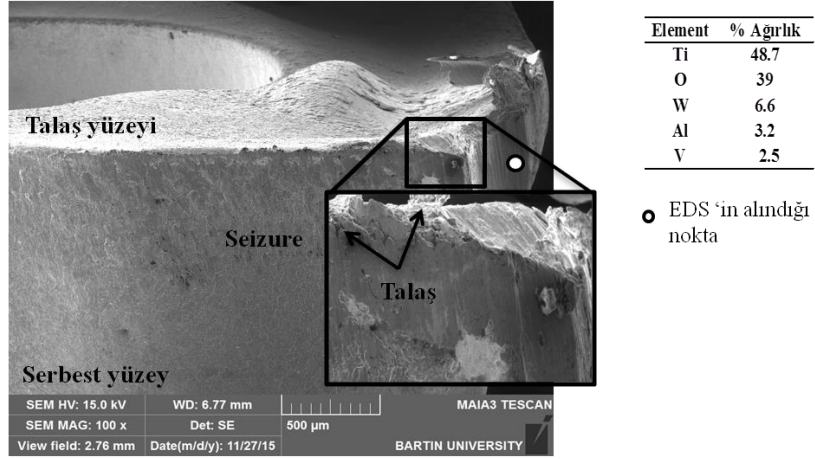
Aşınmış TiN kaplamalı kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 74’de verilmektedir. Takımların serbest yüzeylerinde talaş yapışması bölgeleri (seizure zone) oluşmuştur ve bu oluşum kesme hızıyla artmaktadır. Karbür altlık ve talaşlar oksidasyona maruz kalmıştır ve bu durum elementsel analiz ile doğrulanmıştır. Karbür altlığın aşınması ve iş parçasının takım yüzeyine adezyonu, kesme kuvvetlerinde artışa sebep olmuştur. Kaplama aşındıktan sonra iş parçası malzemesinin kesici kenar üzerine adezyonu gözlenmiştir. Oksidasyon ve abraziv aşınma sonucunda çentikli aşınma meydana gelmiştir. Kaplama aşınma bandı üzerinde elde edilen yüksek % oksijen ağırlığının alümina oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir.



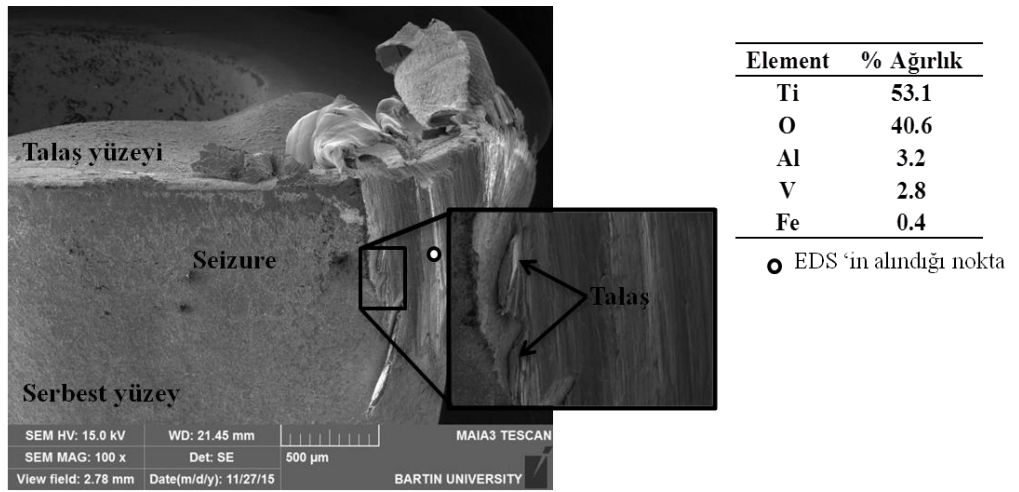
Şekil 74: V_c : 50 m/dak, f_z : 0,1 mm/diş, a_p : 1 mm kesme parametrelerinde aşınmış TiN kaplamalı kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi.



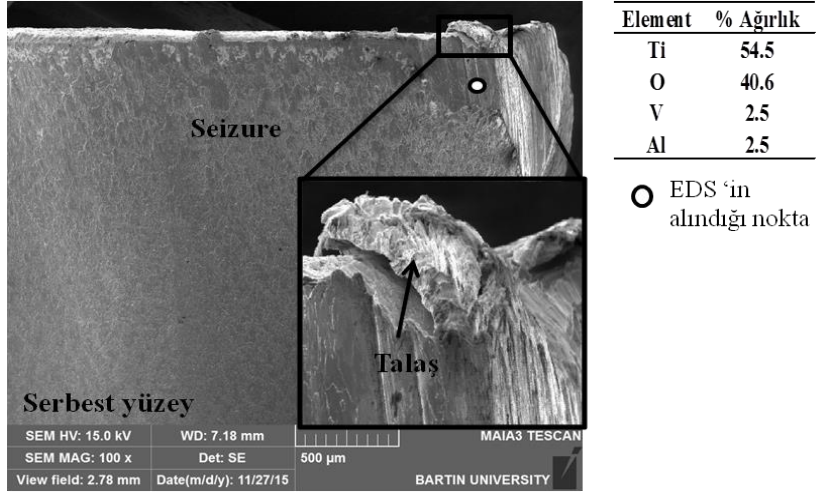
Şekil 75: V_c : 50 m/dak, f_z : 0,1 mm/diş, a_p :1 mm kesme parametrelerinde aşınmış kaplamasız kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi.



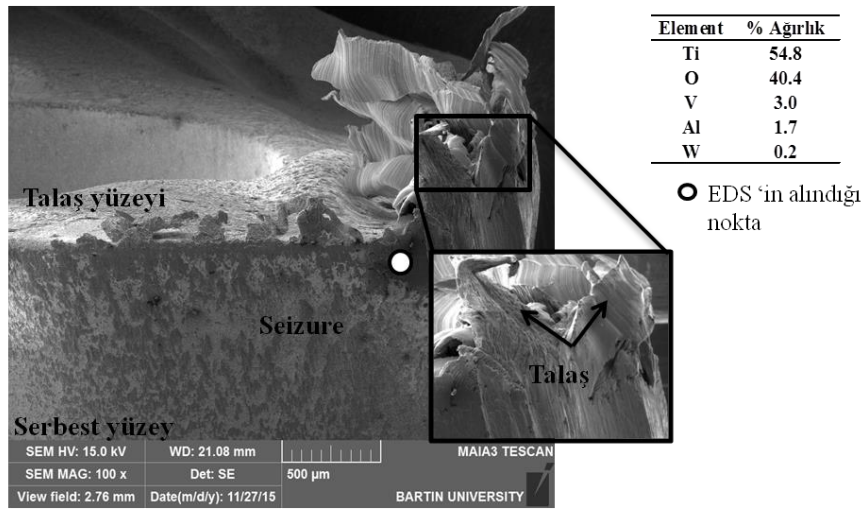
Şekil 76: V_c : 100 m/dak, f_z : 0,1 mm/diş, a_p : 1 mm kesme parametrelerinde aşınmış nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi.



Şekil 77: V_c : 100 m/dak, f_z : 0,1 mm/diş, a_p : 1 mm kesme parametrelerinde aşınmış TiAlN kaplamalı kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi.



Şekil 78: V_c : 100 m/dak, f_z : 0,1 mm/diş, a_p : 1 mm kesme parametrelerinde aşınmış TiN kaplamalı kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi.



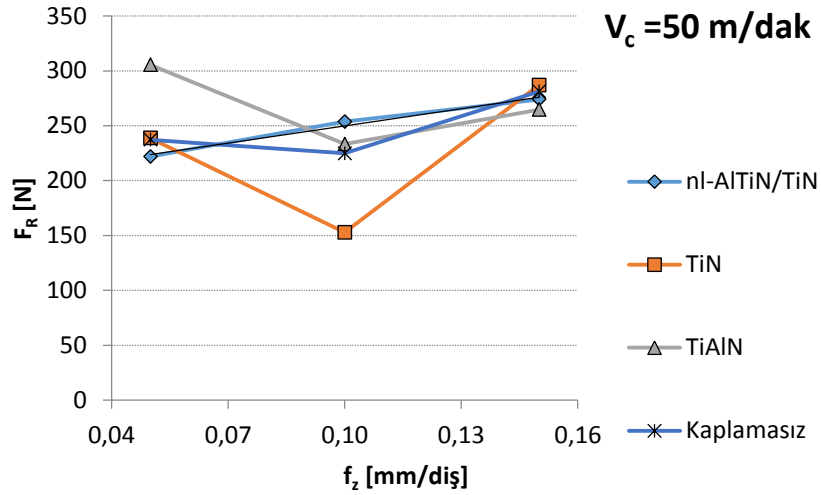
Şekil 79: V_c :100 m/dak, f_z : 0,1 mm/diş, a_p : 1 mm kesme parametrelerinde aşınmış kaplamasız kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi.

5.2.2 Kesme Kuvveti Testleri

5.2.3 Kesici Takımların Bileşke Kesme Kuvvetleri Açısından Karşılaştırılması

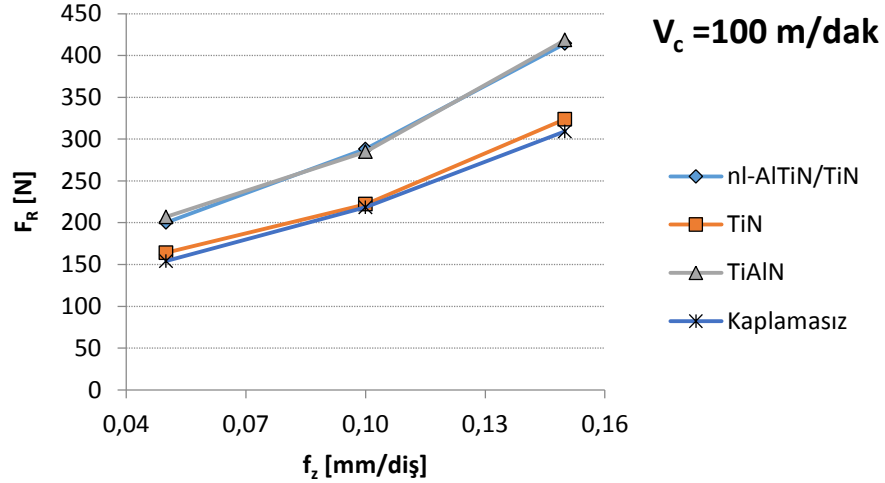
Şekil 80'de 50 m/dak kesme hızında ve üç farklı ilerleme değerinde elde edilen bileşke kesme kuvvetleri görülmektedir. 0,05 mm/diş ilerleme değerinde en küçük bileşke kuvveti nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı takım ile elde edilmiştir. Bu ilerleme değerinde en

yüksek bileşke kesme kuvveti ise TiAlN kaplamalı karbür takım ile elde edilmiştir. 0,1 mm/diş ilerleme değeri için en düşük bileşke kesme kuvveti ise TiN kaplamalı karbür takım ile elde edilmiştir. Aynı şekilde en yüksek bileşke kesme kuvveti ise nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı takım ile ölçülmüştür. 0,15 mm/diş ilerleme değerinde ise en yüksek bileşke kesme kuvveti TiN kaplamalı takım ile ölçülmüştür. Aynı ilerleme değerinde en düşük bileşke kesme kuvveti ise TiAlN karbür takım ile ölçülmüştür. İlerleme oranına bağlı olarak bileşke kesme kuvvetlerinin değişimi incelendiğinde, ilerleme arttıkça talaş kesiti arttığından dolayı, F_R 'nin arttığı gözlenmiştir. Ancak, 0,05 mm/diş ilerleme oranında TiAlN, 0,10 mm/diş ilerleme oranında da TiN kaplamalı takımlar beklenenin dışında bir kesme kuvveti vermişlerdir.



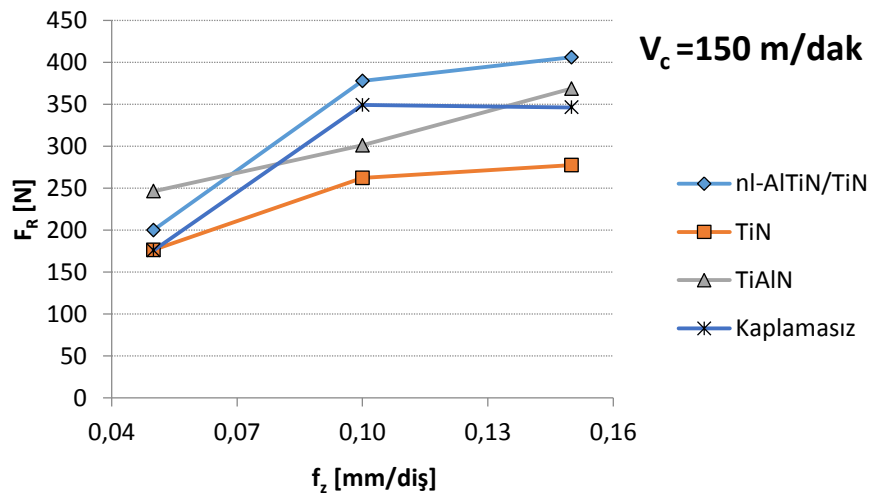
Şekil 80: 50 m/dak kesme hızında bileşke kuvvetlerin ilerleme oranına bağlı olarak değişimi

Şekil 81'de 100 m/dak kesme hızında ve üç farklı ilerleme değerinde bileşke kesme kuvvetinin ilerleme oranına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. En küçük bileşke kuvvet bütün ilerleme oranlarında kaplamasız takım ile elde edilmiştir. nl-AlTiN/TiN ve tek tabakalı TiAlN kaplamalı takımlar ise, bütün ilerleme oranlarında benzer ve en yüksek bileşke kesme kuvvetini vermişlerdir. İlerlemenin artmasıyla, kesme kuvvetlerindeki artış burada da gözlenmektedir. Bunun nedeni, artan ilerleme değeriyle birlikte artan talaş kesitidir (Korkut, 1999).



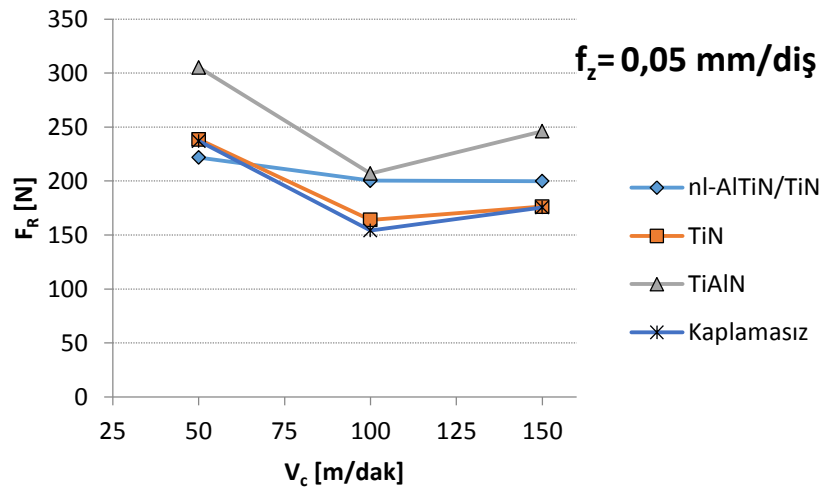
Şekil 81: 100 m/dak kesme hızında bileşke kuvvetlerin ilerleme oranına bağlı olarak değişimi

Şekil 82’de 150 m/dak kesme hızında ve üç farklı ilerleme değerinde elde edilen bileşke kesme kuvvetlerinin değişimi gösterilmektedir. 0,05 mm/diş ilerleme değerinde en küçük bileşke kuvveti kaplamasız ve TiN kaplamalı takımlar ile, en yüksek bileşke kuvvet ise TiAlN kaplamalı karbür takımlar ile elde edilmiştir. 0,10 ve 0,15 mm/diş ilerleme değerlerinde en düşük bileşke kesme kuvveti TiN kaplamalı karbür takımlar ile elde edilmesine rağmen, en yüksek bileşke kesme kuvveti nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı takım ile elde edilmiştir. Şekil 82 incelendiğinde, ilerleme oranı ile birlikte F_R artmasına rağmen, 0,10 mm/diş ilerleme oranından sonra bu artışın az olduğu görülmektedir.



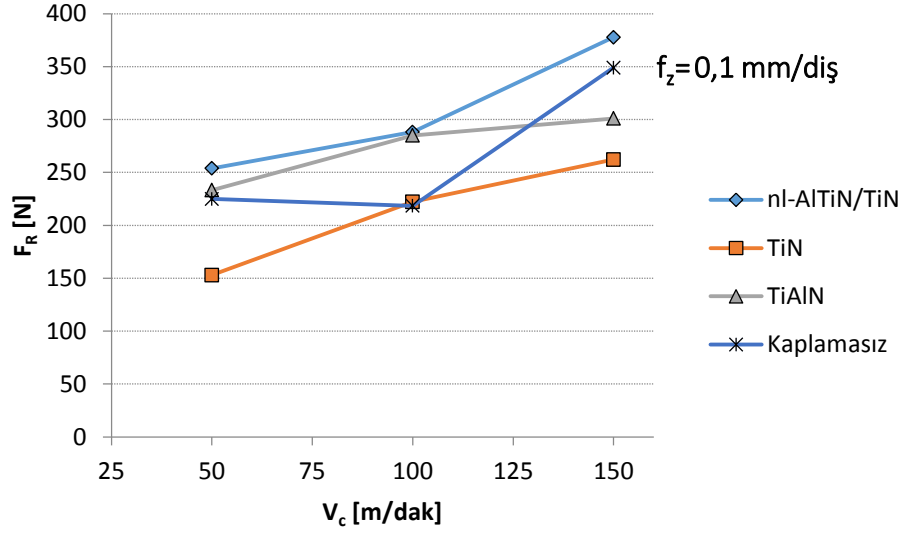
Şekil 82: 150 m/dak kesme hızında bileşke kuvvetlerin ilerleme oranına bağlı olarak değişimi

Şekil 83’de 0,05 mm/diş ilerleme oranında ve üç farklı kesme hızında elde edilen bileşke kesme kuvvetleri görülmektedir. Kesme hızının artmasıyla kesme kuvvetinde önce bir azalma ve sonra bir miktar artış gözlenmiştir. Düşük ilerlemede değerinde (0,05 mm/diş) bileşke kesme kuvvetleri, beklenenin aksine yüksek çıkmıştır ve test edilen bütün takımlarda bu durum benzer özellik göstermiştir. Bu durumun, düşük ilerleme değerinde talaş kesitinin küçük olması ve düşük kesme hızında (50 m/dak) takımın iş parçasına nüfuz yerinin zorlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 0,05 mm/diş ilerleme oranında en uygun kesme hızının 100 m/dak olduğu görülmektedir.



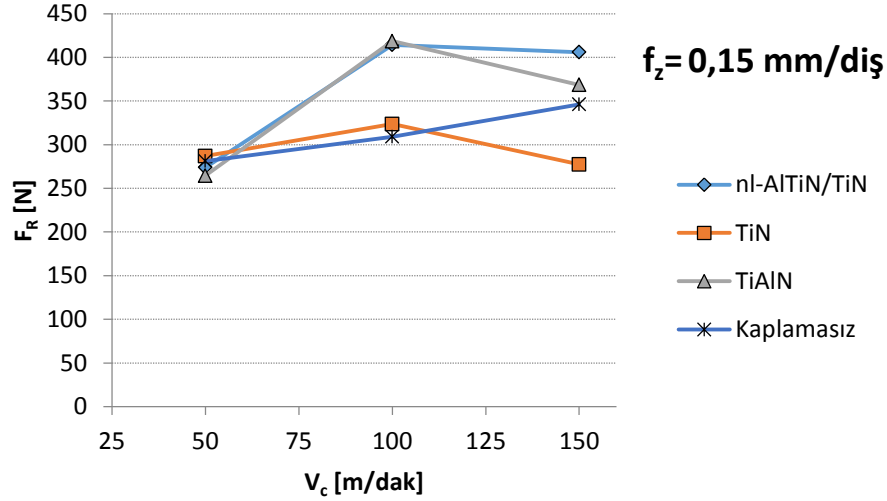
Şekil 83: 0,05 mm/diş ilerleme değerinde bileşke kuvvetlerin kesme hızına bağlı olarak değişimi.

Şekil 84’de 0,1 mm/diş ilerleme oranında ve üç farklı kesme hızında elde edilen bileşke kesme kuvvetleri görülmektedir. Bu ilerleme değerinde, kesme hızıyla birlikte kesme kuvveti (F_R) artış göstermektedir. Bu yüzden, en uygun kesme hızının 50 m/dak olduğu görülmektedir. Aynı kesme hızında en düşük bileşke kesme kuvveti ise TiN kaplamalı karbür takım ile ölçülmüştür.



Şekil 84: 0,1 mm/diş ilerleme değerinde bileşke kuvvetlerin kesme hızına bağlı olarak değişimi.

Şekil 85’de 0,15 mm/diş ilerleme oranında ve üç farklı kesme hızında elde edilen bileşke kesme kuvvetleri görülmektedir. 50 m/dak kesme hızında bütün takımlarda benzer bileşke kuvvet elde edilmiştir. 100 m/dak kesme hızında ise en düşük bileşke kesme kuvveti kaplamasız karbür takımlar ile, en yüksek bileşke kesme kuvveti ise TiAlN ve nl-AlTiN/TiN kaplamalı takımlar ile ölçülmüştür. 150 m/dak kesme hızında ise en yüksek bileşke kesme kuvveti nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı takımlar ile, en düşük bileşke kesme kuvveti ise TiN kaplamalı karbür takımlar ile ölçülmüştür. Kesme hızının artmasıyla kesme kuvveti artmasına rağmen 100 m/dak kesme hızından sonra kaplamalı takımlar ile elde edilen kuvvet değerlerinde bir miktar azalma gözlenmiştir.

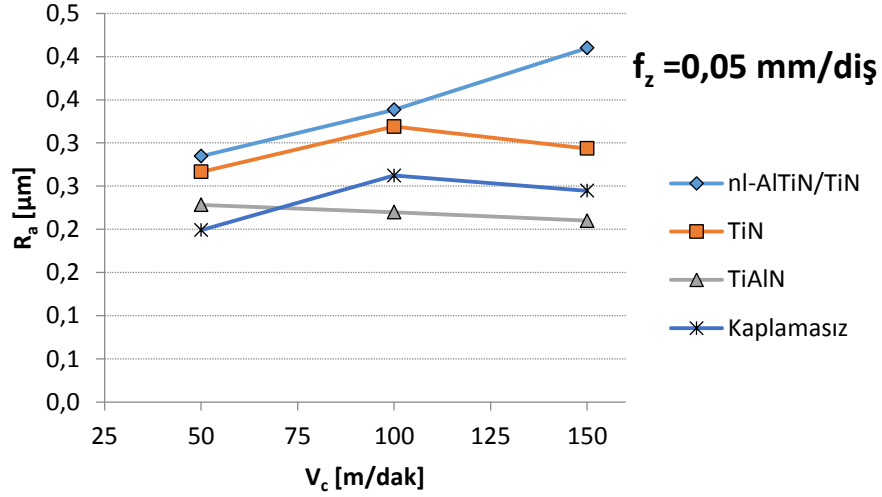


Şekil 85: 0,15 mm/diş ilerleme değerinde bileşke kuvvetlerin kesme hızına bağlı olarak değişimi.

5.2.4 Kesici Takımların İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğü Açısından Karşılaştırılması

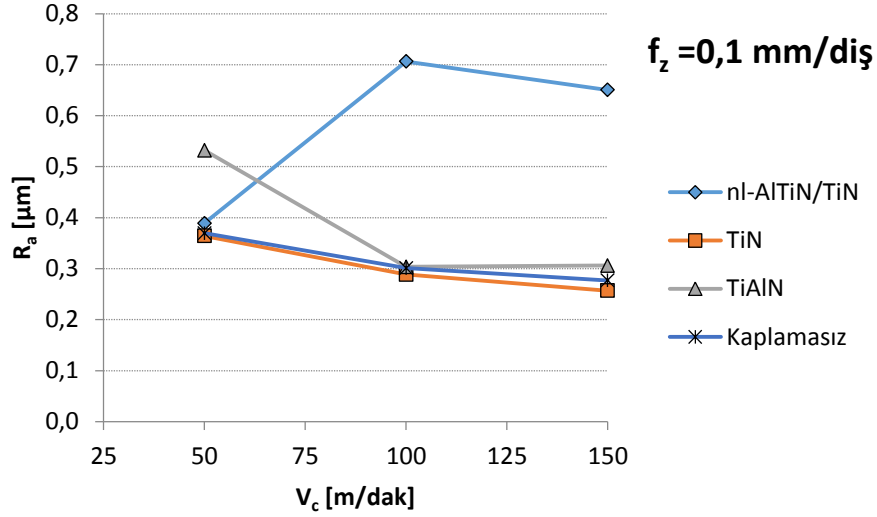
Şekil 86'da 0,05 mm/diş ilerleme değerinde elde edilen pürüzlülük değerleri görülmektedir. 50, 100 ve 150 m/dak kesme hızları için en iyi yüzey katlitesi sırasıyla kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlar ile elde edilmiştir. Nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı takımlar bütün kesme hızlarında kötü yüzey kalitesi vermişlerdir.

Talaşlı imalatla genellikle kesme hızının artmasıyla birlikte yüzey kalitenin iyileşmesi beklenir. Ancak nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı takımlarda, yüksek kesme hızlarında yüksek R_a elde edilmiştir. Bu durumun, artan kesme hızı ile birlikte kesme sıcaklığının, buna bağlı olarak takım aşınmasının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aşınma ile birlikte takım burun yarıçapının artması dolayısıyla yüzey kalitesi iyileşmesine rağmen, nl-AlTiN/TiN kaplamalı takımların yüksek aşınma direncinden dolayı kesici kenar geometrisi korunmuştur. Dolayısıyla, diğer takımlara göre daha yüksek R_a elde edilmiştir. Artan kesme hızı ile birlikte R_a 'nın azalması, yığıntı talaş oluşumunun azalmasına da bağlanabilir.



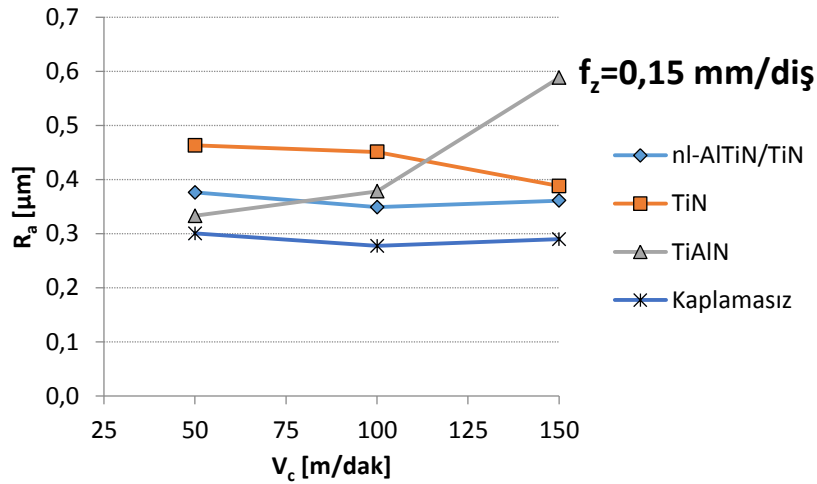
Şekil 86: 0,05 mm/diş ilerleme değerinde kesme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi.

Şekil 87’de 0,1 mm/diş ilerleme değerinde elde edilen pürüzlülük değerleri görülmektedir. 50 m/dak kesme hızında için en yüksek kaliteli yüzey TiN kaplamalı takımlar ile elde edilmiştir. Aynı kesme hızı değeri için en yüksek pürüzlülük değeri TiAlN kaplamalı takımla ölçülmüştür. 100 m/dak kesme hızında en kaliteli yüzey TiN kaplamalı takımlar ile elde edilmiştir. Aynı kesme hızı değeri için en yüksek R_a pürüzlülük değeri nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı takımlar ile ölçülmüştür. 150 m/dak kesme hızında en kaliteli yüzey TiN kaplamalı takımla, en düşük kaliteli yüzey ise nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı takımla ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülük değerlerin genel olarak kesme hızı ile birlikte azaldığı gözlenmiştir. Ancak, nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı takımlar burada da yüksek kesme hızlarında yüksek pürüzlülük vermişlerdir. Bunun nedeni, Şekil 86’da açıklandığı için burada tekrar yazılmamıştır.



Şekil 87: 0,1 mm/diş ilerleme değerinde kesme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi

Şekil 88’de 0,15 mm/diş ilerleme değerinde kesme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi verilmektedir. Bütün kesme hızlarında kaplamasız takımlar, aşınma sonucu artan takım burun yarıçapından dolayı en iyi yüzey kalitesini vermiştir. Değişen kesme hızı ile birlikte, TiAlN kaplamalı takımlar hariç, yüzey pürüzlülüğü değişmemiştir. TiAlN kaplamalı takım da ise yüksek hızlarda (150 m/dak) daha kötü yüzey kalitesi elde edilmiştir.



Şekil 88: 0,15 mm/diş ilerleme değerinde kesme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, Ti6Al4V frezelenmesi işleminde sinterlenmiş karbür kesici takımların performanslarını ve ömürlerini artırmak amacıyla, nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalar, magnetron sıçratma sistemi kullanılarak, AISI D2 altlıklar ve sinterlenmiş karbür kesici takımlar üzerine biriktirilmiş ve karakterizasyonları yapılmıştır. Bu kaplamaların mikrosertlikleri, altlık malzemeye adezyonu ve aşınma oranları belirlenmiş ve konvansiyonel tek tabakalı TiN ve TiAlN kaplamalar ile karşılaştırılmıştır. SEM ve XRD analizleri yapılarak kaplamaların mikroyapısal özellikleri ortaya konmuştur. İş parçasının yani Ti6Al4V alaşımının (~36 HRC) üzerinde yüzey frezeleme deneyleri gerçekleştirilmiş, üretilen kaplamaların ve bununla birlikte kesme parametrelerinin sinterlenmiş karbür kesici takımların kesme performansı ve aşınma davranışları üzerine etkileri belirlenmiştir.

Kaplamalı takımların kesme performansının belirlenmesi için yapılan deneylerde kesme kuvvetlerinin ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünün ölçümleri yapılmıştır. Aşınma davranışlarının belirlenmesi için yapılan deneylerde, kesici takımlardaki aşınma miktarı ölçülmüş ve aşınmış takımlar üzerinde SEM ve EDS analizleri yapılarak aşınma mekanizmaları ve tipleri ortaya konmuştur.

Nanoindentasyon işlemi sonuçları değerlendirildiğinde, sahip olduğu maksimum sertlik, minimum elastisite modülü ve sayesinde tek tabakalı TiAlN kaplamanın, nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamadan daha büyük plastik deformasyon direncine sahip olduğu bulunmuştur. Yapılan çizik testi sonucunda AISI D2 çeliğine en yüksek adezyon nanotabakalı AlTiN/TiN kaplama ile elde edilmektedir. Kaplamalar için elde edilen sürtünme katsayıları karşılaştırıldığında, en düşük sürtünme katsayısı TiAlN kaplama ile elde edilmiştir. En yüksek sürtünme katsayısını nanotabakalı AlTiN/TiN kaplama vermiştir. XRD analizleri sonucunda, kaplamalarda mevcut olan TiAlN kristallerinin yüzey merkezli kübik yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir.

Ti6Al4V alaşımının frezelenmesinde, 0,8 mm çentikli aşınma derinliğine kadar en uzun takım ömürleri, 100 m/dak kesme hızı, 0,1 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme derinliğine sahip kesme parametrelerinde elde edilmiştir. Kaplamalı takımlar arasında da en uzun takım ömrü nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı karbür kesici takımlar ile elde edilmiştir. Aşınma testlerinin hepsinde de temel aşınma mekanizmalarının abrazyon aşınma, oksidasyon aşınma ve adezyon aşınması olduğu tespit edilmiştir. Temel aşınma tipilerinin ise çentikli aşınma ve yığıntı kenar oluşumu olduğu gözlenmiştir. En yoğun yapışma (seizure) bölgeleri 100 m/dak kesme hızı, 0,1 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme derinliğinin kesme parametreleri olarak kullanıldığı aşınma testlerinde elde edilmiştir.

Nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımlar, V_c : 50-100 m/dak, f_z : 0,1 mm/diş ve a_p : 1 mm olan kesme parametrelerinde yüzey pürüzlülüğünde olumlu sonuçlar vermişlerdir.

Nanotabakalı kaplamalıların kesme kuvvetine olumlu bir etkisi gözlenmemiştir. Nanotabakalı kaplamalıların yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumlu bir etki gözlenmemiştir.

6.2 neriler

1. Nanotabakalı AlTiN/TiN, tek tabakalı TiAlN, tek tabakalı TiN kaplamalı karbür kesici takımlar ile kaplamasız takımların ısıll işlem görmüş farklı sertlikteki Ti6Al4V alaşımlarının tornalama ve frezeleme işlemlerindeki kesme ve aşınma performansları yapılabilir.
2. Yapılan frezeleme deneylerinde kesme sıcaklıkları ölçülerek deneyler tekrarlanabilir.
3. CBN takımlar ile de testler yapılarak kaplamalı karbür kesici takımlar ile elde edilen takım ömürleri ile karşılaştırılabilir.
4. Nanotabakalı AlTiN/TiN kaplamalı karbür kesici takımlara kriyojenik ısıll işlem uygulanarak Ti6Al4V alaşımının frezelenmesi sırasında kesme performansı ve aşınma davranışları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Aihua, L., Jianxin, D., Haibing, C., Yangyang, C., Jun, Z. (2012). Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 31: 82-88.
- Akkurt, M. (2006). *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgâhları*. İ.T.Ü. Makine Fakültesi, İstanbul.
- Ali, M.H., Khidhir, B.A., Ansari, M.N.M. ve Mohamed, B. (2013). FEM to predict the effect of feed rate on surface roughness with cutting force during face milling of titanium alloy. *HBRC Journal*, 9: 263-269.
- Anderson, P.M, Li, C. (1995). Hall-Petch relations for multilayered materials. *Nanostructured Materials*, 5: 349-362.
- Arulkirubakaran, D., Senthilkumar, V. ve Kumawat, V. (2015). Effect of micro-textured tools on machining of Ti-6Al-4V alloy: An experimental and numerical approach. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 54: 165-177.
- Baldissera, P., Delprete, C. (2008). Deep cryogenic treatment: Abibliographic review. *Open Mechanical Engineering Journal*, 2: 1-11.
- Basturk S, Senbabaoglu F, Islam C, Erten M, Lazoglu I, Gulmez T. (2010) . Titanium machining with new plasma boronized cutting tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*; 59:101-4
- Bermingham M.J., Palanisamy, S. ve Dargusch M.S. (2012). Understanding the tool wear mechanism during thermally assisted machining Ti6Al4V. *International Journal of Machine Tools&Manufacture*, 62: 76-87.
- Bhattacharyya, D., Mara, N.A., Hoagland, R.G., Misra, A. (2008). Nanoindentation and microstructural studies of Al/TiN multilayers with unequal volume fractions. *Scripta Materialia*, 58: 981-984.
- Cekada, M., Panjan P. (2001). Evaluation of microhardness and elastic properties of multilayer hard coatings by microindentation. *Vacuum*, 61: 235-240.
- Chang, Y., Wang, D. (2007). Characterization of nanocrystalline AlTiN coatings synthesized by a cathodic-arc deposition process. *Surface Coating Technology*, 201: 6699-6701.
- Chen, L., Xu, Y.X., Du, Y., Liu, Y. (2015). Effect of bilayer period on structure, mechanical and thermal properties of TiAlN/AlTiN multilayer coatings. *Thin Solid Films*, 592: 207-214.
- Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T., Yamane, Y., (2000). *Metal Machining: Theory and Applications*. John Wiley & Sons Inc., 408 sayfa. New York.

- Cselle, T., Barimani, A. (1995). Today's applications and future developments of coatings for drills and rotating cutting tools. *Surface Coating Technology*, 76-77: 712-718.
- Çalışkan, H. (2012). Nanotabakalı AlTiN/TiN kaplanmış Karbür Kesici Takımların Sert Malzemelerin Frezelenmesinde Aşınma Davranışlarının Ve Kesme Performanslarının Araştırılması. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Isparta, 188 s.
- Çalışkan, H., Karaoğlu, A.C. (2013). Oxidation behavior of AlTiN/TiN nanolayer hard coating at high temperatures. *Acta Physica Polonica A*, 125(2): 456-458.
- Çalışkan, H., Küçüköke, M., (2015). The effect of aCN/TiAlN coating on tool wear, cutting force, surface finish and chip morphology in face milling of Ti6Al4V superalloy. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 50: 304-312.
- Çiçek, A., Kıvak, T., Uygur, İ., Ekici, E., Turgut, Y. (2012). Performance of cryogenically treated M35 HSS drills in drilling of austenitic stainless steels. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(4): 65-73
- Çiftçi, İ. (2005). Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesici takım kaplamasının ve kesme hızının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20 (2): 205-209.
- Çiftçi, K. (2005). Mikroalaşımli Çeliklerin Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Talaşlı İşlenebilirliğe Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, ABD, İstanbul, 125 s.
- Dandekar, C.R., Shin, Y.C., Barnes, J. (2009). Machinability improvement of titanium alloy (Ti-6Al-4V) via LAM and hybrid machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50: 174-182.
- Donachie, M.J. (1988). *Titanium - A Technical Guide*. ASM International, 2-6.
- Fang, N. ve Wu, Q. (2008). A comparative study of the cutting forces in high speed machining of Ti-6Al-4V and Inconel 718 with a round cutting edge tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 4385-4389.
- Fox-Rabinovich, G.S., Yamamoto, K., Kovalev, A.I., Veldhuis, S.C., Ning, L., Shuster, L.S., Elfizy, A., (2008). Wear behavior of adaptive nano-multilayered TiAlCrN/NbN coatings under dry high performance machining conditions. *Surface & Coatings Technology*, 202: 2015-2022.
- Ghani, J.A., Haron, C.H.C., Hamdan, S.H., Said, A.Y.M. ve Tomadi, S.H. (2012). Failure mode analysis of carbide cutting tools used for machining titanium alloy. *Ceramisc International*, 39: 4449-4456.
- Hamamcı, E. (2014). Ti6Al4V Titanyum Alaşımının Ön Isıtmalı Şartlarda Frezelenmesinin Araştırılması. Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Isparta, 151 s.

- Haron, C.H.C. ve Jawaide, A. (2004). The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 166: 188-192.
- Helmersson, U., Lattemann, M., Bohlmark, J., Ehasarian, A.P., Gudmundsson, J.T. (2006). Ionized physical vapor deposition (IPVD): A review of technology and applications. *Thin Solid Films*, 513: 1-24.
- Hogarth, S. (2000). Cryogenics: a technology seeks legitimacy. *Manufacturing Engineering*, 124 (3): 132-146.
- Holleck, H., Schier, V. (1995). Multilayer PVD coatings for wear protection. *Surface Coating Technology*, 76: 328-336.
- Holmberg, K., Matthews, A. (2009). *Coatings Tribology*. Elsevier, Amsterdam.
- Holubar, P., Jilek, M., Sima, M. (1999). Nanocomposite nc-TiAlSiN and nc-TiN-BN coatings: their applications on substrates made of cemented carbide and results of cutting tests. *Surface and Coatings Technology*, 120-121: 184-188.
- ISO 8688-1.(1989). Tool Life Testing in Milling, Part 1: Face Milling. International Standard.
- İşler, A. (1999). Titanyum Alaşımlarının Isıl İşlem ve Mekanik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, İstanbul, 105 s.
- Jianxin, D., Yousheng, L. ve Wenlong, S. (2008). Diffusion wear in dry cutting of Ti6Al4V with WC/Co carbide tools. *Wear*, 265: 1776-1783.
- Jovanovic, M.T., Tadic, S., Zec, S, Miskovic, Z., Bobic, I. (2006), The effect of annealing temperatures and cooling rates on microstructure and mechanical properties of investment cast Ti-6Al-4V alloy. *Materials and Design*, 27: 192-199.
- Koehler, J.S. (1970). Attempt to design a strong solid. *Physical Review*, B2- 547.
- Korkut, İ. (1999). Dönertaş, M.A., Şeker, U., Üç boyutlu dinamometre tasarımı ve imalatı, *ZKÜ Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Teknoloji Dergisi*, 1(2):115-129
- Kumar, V., Eakambaram, A. ve Arivazhagan, A. (2014). FEM Analysis to Optimally Design End Mill cutters for Milling of Ti6Al4V. *Procedia Engineering*, 97: 1237-1246.
- Kurt, A. (2006). Talaş Kaldırma Sırasında Oluşan Kesme Kuvvetleri ve Mekanik Gerilmelerin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Matematiksel Modellerinin Oluşturulması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Ankara, 140 s.
- Leyens, C., Peters, M. (2003). Titanium and Titanium Alloys: *Fundamentals and Applications*, Wiley-VCH: Weinheim.

- Li, R., Hedge, P., Shih, A.J. (2007). High-throughput drilling of titanium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (1): 63-74
- Lütjering, G. (1998). Influence of processing on microstructure and mechanical properties of (α + β) Titanium Alloys. *Materials Science and Engineering*, A-243: 32-45.
- Lütjering, G., Williams, J. C., Gysler, A. (2000). Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Alloys in *Microstructure and Properties of Materials*. World Scientific Publishing, 452 s.
- Madan, A., Chu, X., Barnett, S.A. (1996). Growth and characterization of epitaxial Mo/NbN superlattices. *Applied Physics Letters*, 68: 2198-2200.
- Matthew, J., Donachie, Jr. (2000). Heat treating titanium and its alloys. *Heat Treating Process*, 47-50.
- Mavi, A. (2013). Kesici Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin Ti6Al4V Titanyum Alaşımının İşlenmesinde Kesici Takım Performansının Etkisi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Ankara, 160 s.
- Mo, J.L., Zhu, M.H., Leyland, A., Matthews, A. (2012). Impact wear and abrasion resistance of CrN, AlCrN and AlTiN PVD coatings. *Surface & Coatings Technology*, 215: 170-177.
- Münz, W.D. (1991). The unbalanced magnetron: current status of development. *Surface Coating Technology*, 48: 81-94.
- Ning, L., Veldhuis, S.C., Yamamoto, K. (2008). Investigation of wear behavior and chip formation for cutting tools with nano-multilayered TiAlCrN/NbN PVD coating. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48: 656-665.
- Ning, Y., Rahman, M., Wong, Y.S., (2001). Investigation of chip formation in high speed end milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 113 (1-3): 360-367.
- Nohava, J., Dessarzin, P., Karvankova, P., Morstein, M. (2014). Characterization of tribological behavior and wear mechanisms of novel oxynitride PVD coatings designed for applications at high temperatures. *Tribology International*, 81: 231-239.
- Oktay, H. (2011). Eğik Yüzeylerin Frezelenmesinde Farklı İşleme Yönlerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Karabük, 110 s.
- Özcan, E. (2001). CNC Tezgahlarda Kullanılan Kesici Takımlarda Takım Aşınmasının Kesme Performansına Dinamik Etkileri. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, İstanbul, 145 s.
- Özel, T., Sima, M., Srivastava, A.K., Kaftanoğlu, B. (2010). Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti-6Al-4V alloy with experiments and finite element simulations. *Cirp Annals - Manufacturing Technology*, 59: 77-82.

- Paldey, S., Deevi, S.C. (2003). Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review. *Materials Science and Engineering: A*, 342(1-2), 58-79.
- Pederson, R., Babusshkin, O., Skystedt, F., Warren, R. (2011). The Use of High Temperature X-Ray Diffractometry to Study Phase Transition in Ti6Al4V in Titanium Alloys at Elevated Temperature: Structural Development and Service Behaviour, Institute of Materials, ISSN 1336-5510, London s.140-155.
- Podgursky, V., Nisumaa, R., Adoberg, E., Surzhenkov, A., Sivitski, A., Kulu, P. (2010). Comparative study of surface roughness and tribological behavior during running-in period of hard coatings deposited by lateral rotating cathode arc. *Wear*, 268: 751-755.
- Podgursky, V., Adoberg, E., Surzenkov, A., Kimmari, E., Viljus, M., Mikli, V.(2011). Dependence of the friction coefficient on roughness parameters during early stage fretting of (Al,Ti)N coated surfaces. *Wear*, 271: 853-858.
- Pramanik, A. ve Littlefair, G. (2015). Machining of titanium alloy (Ti6Al4V)—Theory to application. *Machining Science and Technology: An International Journal*, 19: 1-49.
- Quinto, D.T. (2007). Structure and strength of multilayers. *SVC Bulletin Fall*: 17-35
- Rashid, R.A.R., Palanisamy, S., Sun, S. ve Dargusch, M.S. (2015). Tool wear mechanisms involved in crater formation on uncoated carbide tool when machining Ti6Al4V alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer-Verlac, pp.1-9.
- Riahi, A.R., Jin, L., Farokhzadeh, K., Edrisy, A. (2014). Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti–6Al–4V alloy with experiments and finite element simulations. *Manufacturing Technology*, 59: 77-82.
- Ribeiro, M.V., Moreira, M.R.V., Ferreira, J.R. (2003). Optimization of titanium alloy (Ti6Al4V) machining. *Journal of Materials Processing Technology* 143–144: 458–463 s.
- Sandvik, (2015) www.sandvik.coromant.com (28.11.2015).
- Schintlmeister, W., Wallgram, W., Kanz, J., Gigl, K. (1984). Cutting tool materials coated by chemical vapour deposition. *Wear*, 100: 153-169.
- Semiatin, S.L., Seetharaman, V., Weiss, I. (1997). The Thermomechanical processing of alpha/beta titanium alloys. *Journal Metals*, 49 (6): 33-55
- Sıcakyüz. (2007). Titanyum ve titanyum alaşımlarının Anodik Oksidasyon Davranışı ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimler Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, İstanbul, 105 s.
- Silva, R.B., Machado, A.R., Ezugwu, E.O., Bonney, J. ve Sales, W.F. (2013). Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti–6Al–4V alloy with PCD tools

- under various coolant pressures. *Journal of Materials Processing Technology*, 213: 1459-1464.
- Sima, M., Özel, T. (2010). Modified material constitutive models for serrated chip formation simulations and experimental validation in machining of titanium alloy Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50: 943-960.
- Springer, W., Catlett, D.S. (1978). Structure and mechanical properties of Al/Al_xO_y vacuumdeposited laminates. *Thin Solid Films*, 54: 197-205.
- Stephenson, D.A., Agapiou, J.S. (2006). *Metal Cutting Theory and Practise*. CRC Pres, Boca Raton, Boca Raton.
- Şeker, U. (1997). *TAl 408 Takım Tasarımı Ders Notları*. Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Ankara, s.50-65
- Tsui, T.Y., Pharr, G.M., Oliver, W.C., Bhatia, C.S., White, R.L., Anders, S., Anders, A., Brown, I.G. (1995). Nanoindentation and nanoscratching of hard carbon coatings for magnetic disks. *Proceedings of Materials Research Society Symposium* 383: 447-452.
- Tekaüt, G. (2008). Takım Tezgahlarındaki Kesici Takım Titreşiminin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Ankara, 120 s.
- Ulutun D, Ozel T. (2011).Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51: 250-80.
- URL-1 (2011). https://www.atimetals.com/Documents/ati_6-4_tds_en_v1.pdf, US and foreign patents, 28 Kasım 2015.
- Weiss, I., Froes, F.H., Eylon, D., Welsh, G.E. (1986). Modification of Alpha Morphology in Ti6Al4V by Thermomechanical Processing. *Metallurgical and Materials Transactions*, 17A: 1935-1947.
- Wo, P.C., Munroe, P.R., Zhou, Z.F., Li, K.Y, Xie, Z.H. (2010). Effects of TiN sublayers on the response of TiSiN nanocomposite coatings to nanoidentation and scratching contacts. *Materials Science and Engineering A*, 527: 4447-4457.
- Yashar, P., Chu, X., Barnett, S.A., Rechner, J., Wang, Y.Y.,Wong, M.S. ve diğerleri. (1998). Stabilization of cubic CrN0.6 in CrN0.6/TiN superlattices. *Applied Physics Letters*, 72: 987-989.
- Yıldız, F., Alsara, A., Çelik, A., Efeoğlu, İ. (2010). Multipass scratch test behaviour of TiAlN thin film deposited on 316L stainless steel and Ti6Al4V alloy with dc biased and pulse magnetron sputtering. *Surface Engineering*, 26: 120-240
- Youssef, H. A. ve El-Hoyf, H. (2008). *Milling Machines and Operations. Machining Technology: Machine Tools and Operation*. CRC Press, ABD, s.82-85.

- Zeman, P. ve Madl, J. (2008). Milling of Ti6Al4V alloy with cemented carbide tools. *Research Center of Manufacturing Technology*, 15: 155-163.
- Zieber, C., Ulrich, S. (2006). Hard multilayer coatings containing TiN and/or ZrN: A review and recent progress in their nanoscale characterization. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 24: 554-583.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Emre ALTAŞ
Doğum Yeri ve Tarihi : KIRŞEHİR / 12.06.1988

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine
Mühendisliği (2009-2013)

Yüksek Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine
Mühendisliği (2013-2015)

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce (İyi Derecede)

Bilimsel Faaliyet/Yayınlar :1.Çalışkan, H., Panjan, P., Čekada, M., Altaş, E., 2014.
Adhesion and wear behavior of multilayer nanocomposite
TiAlSiN/TiSiN/TiAlN coating. 30. European Conference on
Surface Science, Antalya, Turkey

2.Calışkan, H. Altaş, E. Panjan, P. 2015. Experimental
Investigation of Surface Integrity of Hardened AISI D2 Steel
at Cutting Conditions from Conventional to High Speed
Machining. 8th International Conference and Exhibition on
Design and Production of Machines and Dies/Molds, Aydın,
Turkey.

Aldığı Ödüller :

İş Deneyimi

Stajlar : Çemaş Döküm Sanayi A.Ş (Kırşehir, 2011)

Oralsan Makine A.Ş (Kırşehir, 2012)

Projeler ve Kurs Belgeleri :

Çalıştığı Kurumlar : Bartın Üniversitesi (2014 – Halen Devam Etmekte)

İletişim

E-Posta Adresi : emrealas@bartin.edu.tr

Tarih : 29.12.2015