

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**FARKLI HELİS AÇILARIYLA ÜRETİLEN TiSiN, AlCrN, AlTiN, ZrN KAPLANMIŞ
TUNGSTEN KARBÜR PARMAK FREZELERİN METAL YÜZEYİNİ AŞINDIRMA
VE TALAŞ KALDIRMA PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

Cem ARSLAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Yahya TAŞGIN**

TUNCELİ – 2025

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FARKLI HELİS AÇILARIYLA ÜRETİLEN TiSiN, AlCrN, AlTiN, ZrN KAPLANMIŞ
TUNGSTEN KARBÜR PARMAK FREZELERİN METAL YÜZEYİNİ AŞINDIRMA
VE TALAŞ KALDIRMA PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

Cem ARSLAN
220077118

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yahya TAŞGIN

TUNCELİ – 2025

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FARKLI HELİS AÇILARIYLA ÜRETİLEN TiSiN, AlCrN, AlTiN, ZrN KAPLANMIŞ
TUNGSTEN KARBÜR PARMAK FREZELERİN METAL YÜZEYİNİ AŞINDIRMA
VE TALAŞ KALDIRMA PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

Cem ARSLAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 27/05/2025 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza:.....

İmza:.....

İmza:.....

Doç. Dr. Yahya TAŞGIN
(Munzur Üniversitesi)

Prof. Dr. Üyesi Uğur ÇALIGÜLÜ
(Fırat Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Salih AĞAR
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

ÜYE

ÜYE

Bu seminer, Enstitümüz Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Nagihan KARAASLAN AYHAN
Enstitü Müdürü

NOT: Bu seminerde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir

27/05/2025

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İmza
Cem ARSLAN

Danışman
Doç. Dr. Yahya TAŞGIN

ÖZET

Talaşlı imalat yöntemlerinden biri olan frezeleme işlemi, günümüz sanayisinde en çok kullanılan talaşlı imalat yöntemlerinden biridir. Günümüzde HSS ve Tungsten Karbür (WC) parmak frezeler yaygın şekilde kullanılmaktadır. HSS frezeler gelişen malzeme teknolojisi ve imalat yöntemleriyle birlikte yerini WC parmak frezelere bırakmıştır. Bir parmak frezede bulunması gereken özellikler, yüksek hızlarda kesme yapabilmesi ve aşınma ömrünün uzun olmasıdır.

Tungsten Karbür (WC) parmak frezeler ultra sertliklerinden dolayı takım aşınmalarına karşı dayanıklıdır. Bu çalışmada WC parmak frezeler geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Parmak frezelerde helis açıları değiştirilerek talaşlı üretim açısından analizi yapılmıştır. Bu analizlerde helis açısının değiştirilmesiyle aşınma ömrünün uzadığı görülmüştür. Bu da bir kesici takımdan istenen en önemli özelliktir. Yine bu çalışmamızda aşınma dayanımı yüksek olan parmak frezelere ZrN, AlTiN, AlCrN, TiSiN kaplamaları yaparak aşınma dayanımları ve kesme ömürleri daha da artırılmıştır.

Yapılan çalışma sonucunda 30, 50, 60 derecelik helisel açısına sahip parmak frezenin kullanımının daha avantajlı olacağı kaplama açısından ise AlTiN kaplamanın hem parmak freze ömrü açısından hem aşınma açısından diğer kaplamalara göre üstünlüklerinin olduğu görülmüştür.

Üretilen parmak frezelerin ana malzemesi olan WC'ün kaplamalarla olan yapısal bağını daha iyi görebilmek için mikro yapı analizleri sonucunda dört kaplama malzemesinin de yapısal olarak uyumlu olduğu görülmüştür. Daha farklı alaşım elementleri kullanılarak veya kullanılan kaplamaları değiştirilerek yapılacak çalışmaların parmak frezelerin karakteristiklerini belirlemekte ı ışık tutacağı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Tungsten karbür parmak freze, farklı helis açılı parmak freze, kaplanmış parmak freze, talaş geometrisi, yüzey pürüzlülüğü.

ABSTRACT

Comparison of the Abrasion and Material Removal Performance of TiSiN, AlCrN, AlTiN, and ZrN Coated Tungsten Carbide End Mills Produced with Different Helix Angles on Metal Surfaces

Milling, one of the machining methods, is one of the most commonly used machining methods in today's industry. Today, HSS and Tungsten Carbide (WC) end mills are widely used. HSS end mills have been replaced by WC end mills with developing material technology and manufacturing methods. The features that an end mill should have are the ability to cut at high speeds and have a long wear life.

Tungsten Carbide (WC) end mills are resistant to tool wear due to their ultra-hardness. In this study, work was done on the development of WC end mills. The helix angles of the end mills were changed and their analysis was made in terms of machining. In these analyses, it was seen that the wear life was extended by changing the helix angle. This is the most important feature desired from a cutting tool. Again, in this study, the wear resistance and cutting life of the end mills with high wear resistance were increased by applying ZrN, AlTiN, AlCrN, TiSiN coatings.

As a result of the study, it was seen that the use of end mills with helical angles of 30, 50, 60 degrees would be more advantageous, and in terms of coating, AlTiN coating has advantages over other coatings in terms of both end mill life and wear. In order to better see the structural bond of WC, the main material of the end mills produced, with the coatings, it was seen that all four coating materials were structurally compatible as a result of microstructure analyses. It is thought that studies to be conducted using different alloy elements or changing the coatings used will shed light on determining the characteristics of end mills.

Key words: Tungsten carbide end mill, end mill with different helix angles, coated end mill, chip geometry, surface roughness.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, her zaman beni çalışmaya sevk eden değerli danışman hocam, Doç. Dr. Yahya Taşgın' a, zor zamanlarımda maddi, manevi yanımda olup beni destekleyen ablam Çiğdem Arslan Yeniocak' a, eniştem İmren Yeniocak'a, annem Gülşen Arslan'a, babam Ahmet Arslan'a, kardeşim kadar yakın arkadaşım Murat Hatay'a ve kedim Bulut'a teşekkürü borç bilirim.

Cem Arslan
TUNCELİ-2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	IX
SEMBOLLER LİSTESİ	X
KISALTMALAR LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	2
2.1. Metal Kesme Mekanikliği	2
2.1.1. Dik (Ortogonal) kesme mekanikliği	2
2.1.2. Eğik kesme mekanikliği	3
3. FREZELEME	4
3.1. Parmak Freze Çeşitleri.....	4
3.1.1. Düz köşeli parmak freze	4
3.1.2. Köşe radyuslu parmak freze	5
3.1.3. Küre formulu parmak frezeler	6
3.2. Parmak frezelerde geometri.....	7
3.3. Frezeleme İşlemi İçin Parmak Frezenin Seçim Kriterleri	8
3.4. Parmak Frezede Takım Aşınması.....	9
3.4.1. Parmak frezede takım aşınmasının ölçüm standardı	9
4. KAPLAMA YÖNTEMLERİ.....	12
4.1. PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) Yöntemi	13
4.1.1. Buharlaştırma ile PVD kaplama yöntemleri.....	13
4.2. PVD Tekniğinde Kullanılan Başlıca Kaplama Malzemeleri.....	14
4.2.2. AlTiN (Alüminyum Titanyum Nitrür) kaplama.....	15
4.2.4. TiSiN (Titanyum Silisyum Nitrür) kaplama.....	16
5. METERYAL ve METOD	17
5.1. Deneyisel Çalışmada Kullanılan Tezgah, Cihaz Ve Malzemeler.....	17
5.1.1. Freze tezgahı.....	17
5.1.2. Termal ölçüm cihazı	17
5.1.3. Kızılötesi termometre	18
5.1.4. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı	19
5.1.5. Dijital mikroskop.....	19
5.1.6. 5 Eksen CNC taşlama tezgahı	20
5.2. Deneyde Kullanılan 1040 Çeliğinin İşleme Operasyonu	21
5.3. Deneyde Kullanılan Parmak Frezelerin İşlenmesi	23
5.4. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	28
5.4.1. 1040 çeliği	28
5.4.2. Tungsten karbür (WC) parmak freze	29
5.4.3. Elmas taş seti	30
5.5. Kaplama İşlemleri ve Parmak Frezenin Kaplama Operasyonları	31
6. BULGULAR	34
6.1. Çalışmada Kullanılan Kaplamaların Mikro Yapı Analizleri	34
6.1.1. ZrN kaplama için analizler	34
6.1.2. AlCrN kaplama için analizler	36
6.1.3. TiSiN kaplama için analizler	39

6.1.4. AlTiN kaplama için analizler	41
6.2. Parmak Frezelerin Kaplama Türlerine ve Helis Açıklarına Göre Karakteristik İncelenmesi	43
6.2.1. ZrN kaplanmış parmak frezenin karakteristiği	43
6.2.2. AlCrN kaplanmış parmak frezenin karakteristiği	50
6.2.3. TiSiN kaplanmış parmak frezenin karakteristiği	55
6.2.4. AlTiN kaplama işleminin karakteristik incelemesi	60
6.2.4.1. AlTiN kaplama için aşınma karakteristiği	64
7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	69
8. KAYNAKLAR.....	71



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Talaş kaldırma işlemi	2
Şekil 2.2. Ortogonal kesme geometrisi	3
Şekil 2.3. Eğik kesme geometrisi	3
Şekil 3.1. Keskin köseli parmak freze	4
Şekil 3.2. Keskin köşeli parmak freze operasyon örnekleri	5
Şekil 3.4. Köşe radyuslu parmak freze operasyon örneği	5
Şekil 3.5. Küre formlu parmak freze	6
Şekil 3.6. küre formlu parmak freze operasyon örnekleri	6
Şekil 3.8. Frezelemede üç önemli faktör	8
Şekil 3.9. Yan duvar ve fatura işlenmesi	8
Şekil 3.10. Parmak frezelerdeki aşınma biçimleri	9
Şekil 3.11. Düzenli yan yüzey aşınması	10
Şekil 3.12. Düzenli olmayan yan yüzey aşınması	10
Şekil 3.13. Bölgesel yan yüzey aşınması	11
Şekil 3.14. Krater aşınması	11
Şekil 4.1. Kaplanacak malzemenin bulunduğu fiziksel duruma göre kaplamaların sınıflandırılması	12
Şekil 4.2. Buharlaştırma yönteminin şematik gösterilişi	14
Şekil 5.1. Deneyde kullanılan NC kontrollü Freze tezgahı	17
Şekil 5.2. Testo 875-2i model termal kamera cihazı	18
Şekil 5.3. Unit UT306S serisi termometre cihazı	18
Şekil 5.4. Mitutoyo 'Surfester SJ-210 yüzey ölçüm cihazı ve ölçüm iğnesi	19
Şekil 5.5. Dino-Lite Premier AM4113ZT dijital mikroskop	20
Şekil 5.6. Michael Deckel marka Flexus S22 model taşlama tezgahı	20
Şekil 5.7. Flexus S22 CNC tezgahın tasarım parametreleri sayfaları	21
Şekil 5.8. Operasyonlarda kullanılan 1040 çeliğinin görseli	21
Şekil 5.9. Parmak freze ve 1040 çeliğinin bağlanmış hali	22
Şekil 5.10. İşlem sonunda çeliğin lazerli sıcaklık ölçümü ve termal görüntüsü	23
Şekil 5.12. Flexus S22 de programın arayüzü	25
Şekil 5.13. 10°, 30°, 50°, 60° derece frezelerin tasarımları	25
Şekil 5.14. Karbür çubuğun CNC taşlama tezgahında elmas taş seti ile işlenmesi	26
Şekil 5.15. 10°, 30°, 50°, 60° derece numuneler	26
Şekil 5.16. İşlenen numunelerin mikroskopik görüntüleri	27
Şekil 5.17. Sırasıyla 30° AlCrN, TiSiN, AlTiN, ZrN kaplanmış numunelerin alın görüntüleri	27
Şekil 5.18. Sırasıyla 30° AlCrN, TiSiN, AlTiN, ZrN kaplanmış numunelerin yanal görüntüleri	28
Şekil 5.19. Taşlama işleminde kullanılan elmas taş örnekleri (URL-15, 2025)	31
Şekil 6.1. ZrN analizi için kaplanmış WC numune ve alınan kesit görüntüsü	34
Şekil 6.2. ZrN kaplanmış numune yüzeyinden alınan Mapping analizi	35
Şekil 6.3. ZrN kaplanmış numune yüzeyinden alınan bölgesel EDS analizi	36
Şekil 6.4. ZrN kaplanmış numune yüzeyinden alınan çizgisel EDS analizi	36
Şekil 6.5. AlCrN analizi için kaplanmış WC numune ve alınan kesit görüntüsü	37
Şekil 6.6. AlCrN kaplanmış numune yüzeyinden alınan Mapping analizi	37
Şekil 6.7. AlCrN kaplanmış numune yüzeyinden alınan bölgesel EDS analizi	38
Şekil 6.8. AlCrN kaplanmış numune yüzeyinden alınan çizgisel EDS analizi	38

Şekil 6.9. TiSiN analizi için kaplanmış WC numune ve alınan kesit görüntüsü	39
Şekil 6.10. TiSiN kaplanmış numune yüzeyinden alınan Mapping analizi	39
Şekil 6.11. TiSiN kaplanmış numune yüzeyinden alınan bölgesel EDS analizi	40
Şekil 6.12. TiSiN kaplanmış numune yüzeyinden alınan çizgisel EDS analizi	40
Şekil 6.13. AlTiN analizi için kaplanmış WC numune ve alınan kesit görüntüsü.....	41
Şekil 6.15. AlTiN kaplanmış numune yüzeyinden alınan bölgesel EDS analiz	42
Şekil 6.16. AlTiN kaplanmış numune yüzeyinden alınan çizgisel EDS analizi	42
Şekil 6.17. ZrN kaplanmış 10°,30°,50°,60° helisli frezelerin çelik ve takım üzerindeki sıcaklık değerleri.....	43
Şekil 6.18. Yüzey ölçüm cihazının ekran görüntüsü.....	43
Şekil 6.19. ZrN kaplanmış parmak freze ile işlenmiş malzemelerin yüzey görselleri	44
Şekil 6.20. 1040 çeliğinin helislere göre Ra (Roughness Average) cinsinden yüzey pürüzlülüğü grafiği.....	44
Şekil 6.21. ZrN kaplanmış, sırasıyla 10°,30°, 50°, 60° helis açılı parmak frezenin talaş yapısı ve rengi ve boyutu.....	45
Şekil 6.22. Çeliğin ısı etkisiyle aldığı renklerin kartelası.....	45
Şekil 6.23. ZrN talaş sıcaklıkları	46
Şekil 6.24 ZrN kaplama talaş uzunlukları	46
Şekil 6.25. ZrN kaplanmış 10° parmak freze için aşınma görselleri.....	47
Şekil 6.26. ZrN kaplanmış 30° parmak freze için aşınma görselleri.....	48
Şekil 6.27. ZrN kaplanmış 50° parmak freze için aşınma görselleri.....	49
Şekil 6.28. ZrN kaplanmış 60° parmak freze için aşınma görselleri.....	49
Şekil 6.29. AlCrN kaplanmış 10°,30°,50°,60° helisli frezelerin çelik ve takım üzerindeki sıcaklık değerleri.....	50
Şekil 6.30. AlCrN kaplanmış parmak freze ile işlenmiş malzemelerin yüzey görselleri....	50
Şekil 6.31. 1040 çeliğinin AlCrN kaplamadaki helislere göre Ra cinsinden yüzey	51
pürüzlülüğü grafiği	51
Şekil 6.32. AlCrN kaplanmış, sırasıyla 10°,30°, 50°, 60° helis açılı parmak frezenin talaş yapısı ve rengi ve boyutu.....	51
Şekil 6.33. AlCrN talaş sıcaklıkları.....	52
Şekil 6.34. AlCrN kaplama talaş uzunlukları.....	52
Şekil 6.35. AlCrN kaplanmış 10° parmak freze için aşınma görselleri	53
Şekil 6.36. AlCrN kaplanmış 30° parmak freze için aşınma görselleri	54
Şekil 6.37. AlCrN kaplanmış 50° parmak freze için aşınma görselleri	54
Şekil 6.38. AlCrN kaplanmış 60° parmak freze için aşınma görselleri	55
Şekil 6.39. TiSiN kaplanmış 10°,30°,50°,60° helisli frezelerin çelik ve takım üzerindeki sıcaklıkdeğerleri.....	56
Şekil 6.40. TiSiN kaplanmış parmak freze ile işlenmiş malzemelerin yüzey görselleri.....	56
Şekil 6.41. 1040 çeliğinin TiSiN kaplamadaki helislere göre Ra cinsinden yüzey	56
pürüzlülüğü grafiği	56
Şekil 6.42. TiSiN kaplanmış, sırasıyla 10°,30°, 50°, 60° helis açılı parmak frezenin talaş yapısı ve rengi ve boyutu.....	57
Şekil 6.43. TiSiN talaş sıcaklıkları.....	57
Şekil 6.44. TiSiN kaplama talaş uzunlukları.....	58
Şekil 6.45. TiSiN kaplanmış 10° parmak freze için aşınma görselleri	59
Şekil 6.47. TiSiN kaplanmış 50° parmak freze için aşınma görselleri	60
Şekil 6.48. TiSiN kaplanmış 60° parmak freze için aşınma görselleri	60
Şekil 6.49. AlTiN kaplanmış 10°,30°,50°,60° helisli frezelerin çelik ve takım üzerindeki sıcaklık değerleri	61

Şekil 6.50. AlTiN kaplanmış parmak freze ile işlenmiş malzemelerin yüzey görselleri	61
Şekil 6.51. 1040 çeliğinin AlTiN kaplamadaki helislere göre Ra cinsinden yüzey pürüzlülüğü grafiği	62
Şekil 6.52. AlTiN kaplanmış, sırasıyla 10°,30°, 50°, 60° helis açılı parmak frezenin talaş .. yapısı ve rengi ve boyutu.....	62
Şekil 6.53. AlTiN talaş sıcaklıkları	63
Şekil 6.54. AlTiN kaplama talaş uzunlukları	63
Şekil 6.55. AlTiN kaplanmış 10° parmak freze için aşınma görselleri.....	64
Şekil 6.56. AlTiN kaplanmış 30° parmak freze için aşınma görselleri.....	65
Şekil 6.57. AlTiN kaplanmış 50° parmak freze için aşınma görselleri.....	65
Şekil 6.58. AlTiN kaplanmış 60° parmak freze için aşınma görselleri.....	66
Şekil 6.60. Yapılan tüm kaplamaların çelik yüzeyindeki pürüzlülük değerleri karşılaştırmaları.....	67
Şekil 6.61. Yapılan tüm kaplamaların talaş sıcaklık karşılaştırmaları	67
Şekil 6.62. Yapılan tüm kaplamaların aşınma performansları	68

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. PVD yöntemi ile yapılan kaplamalara ait fiziksel özellikler.....	13
Tablo 4.2. Bazı ince sert film kaplamaları ve özellikleri.....	15
Tablo 4.3. Zirkonyum nitrür kaplamanın özellikleri	15
Tablo 5.1. Üretilen numune parmak frezelerin ölçü değerleri.....	24
Tablo 5.2. 1040 çeliğinin özellikleri	29



SEMBOLLER LİSTESİ

Al	: Alüminyum
Al₂O₃	: Dialüminyum Trioksit
AlCr	: Alüminyum Krom
AlCrN	: Alüminyum Krom Nitrür
AlTi	: Alüminyum Titanyum
AlTiN	: Alüminyum Titanyum Nitrür
BN	: Bor Nitrür
Cr	: Krom
Cr-AlN	: Krom Alüminyum Nitrür
CrCN	: Krom Karbonitrür
CrN	: Krom Nitrür
Cu	: Bakır
KT	: Krater aşınması
KT1	: 1. Krater aşınması
Ti	: Titanyum
TiAlCN	: Titanyum Alüminyum Krom Nitrür
TiAlN	: Titanyum Alüminyum Nitrür
TiAlN	: Titanyum Alüminyum Nitrür
TiBN	: Titanyum Bor Nitrür
TiBN	: Titanyum Bor Nitrür
TiC	: Titanyum Karbür
TiCN	: Titanyum Karbo Nitrür
TiCN	: Titanyum Karbonitrür
TiN	: Titanyum Nitrür
TiSi	: Titanyum Silisyum
TiSiCN	: Titanyum Silisyum Karbonitrür
TiSiN	: Titanyum Silisyum Nitrür
TiZrN	: Titanyum Zirkonyum Nitrür
V	: Kesme Hızı
Vb	: Yan yüzey aşınması
VB1	: Düzenli yan yüzey aşınması
VB2	: Düzenli olmayan yan yüzey aşınması
VB3	: Bölgesel yan yüzey aşınması
W	: Tungsten
WC	: Tungsten Karbür
x, y, z	: Kartezyen koordinatlar
Zr	: Zirkonyum
ZrN	: Zirkonyum Nitrür
µm	: Mikrometre

KISALTMALAR LİSTESİ

CIRP	: Uluslararası Üretim Aşamaları Mühendisliği Enstitüsü
HSS	: High Speed Steel-Yüksek Hız Çeliği
PVD	: Physical Vapour Deposition-Fiziksel Buhar Biriktirme
CNC	: Computer Numerical Control
Ra	: Roughness Average



1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte, metal işleme yöntemleri oldukça ilerlemiştir. Bu gelişmelerle birlikte metalin daha mukavim hale gelmesinden dolayı geleneksel kesici takım teknolojisi de yetersiz kalmıştır.

Tüm bu gelişimler doğrultusunda kesici takım malzemelerinde yeniliğe gidilmiş geleneksel kesici takım malzemesi olan yüksek hız çelikleri (HSS), yerini tungsten karbür (WC) kesici takımlara bırakmıştır. Dünyanın en sert metallerinden biri olan tungsten, sert çeliklerde oldukça yüksek aşınma direnci sayesinde yüksek kesme performansı göstermiştir.

Sert ve dayanıklı yapısı sayesinde, işleme sürelerini oldukça azaltarak maliyetleri düşürme açısından kendini ispatlamıştır. Tungsten karbür her ne kadar aşınma direnci yüksek bir malzeme olsa da, talaş kaldırma işlemi sırasında maruz kaldığı yüksek sıcaklık, kesme kuvveti, sürtünme gibi nedenlerden dolayı aşınmaya uğramaktadır.

Bu aşamada bu olumsuz etkenleri ortadan kaldırmak için tungsten karbürün kaplanması takım ömrü için son derecede önemlidir. Kesici takımların kaplanması amacıyla kullanılan malzemenin yüzey özelliklerini iyileştirmektir. Kaplama kesici takımda oluşan sürtünme kuvvetini azaltır, ısı şokları engeller, takımın kesici ağzının aşınmasına karşı koruyucu bir duvar işlevi görür. Böylece hem takımın ömrü uzatılmış hem de verimi yükseltilmiş olur. 1970' li yılların başından itibaren başlayan kesici takımlarla ilgili çalışmalar ve kaplanmış takımlar, talaşlı imalat süreçlerinde önemli bir geliştirme olarak kabul edilmiştir. Titanyum karbür (TiC), titanyum nitrür (TiN), titanyum karbonitrür (TiCN), krom nitrür (CrN) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) yaygın olarak kullanılan kaplama malzemelerindendir.

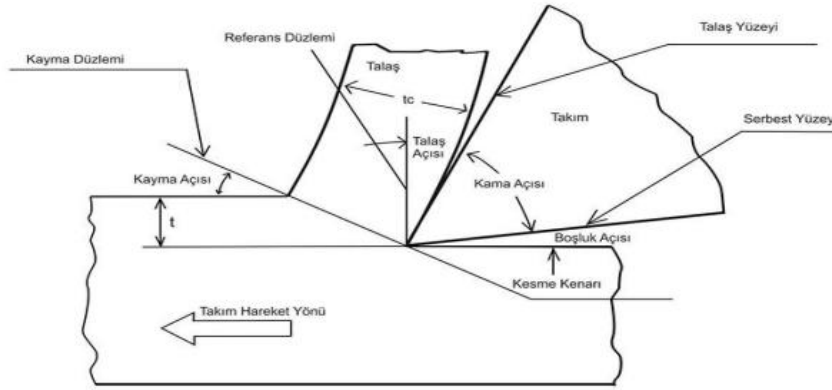
Yapılan çalışmalarda kaplanmış kesici takımların, kaplanmamış kesici takımlara göre %10 ile %30 arasında ömür artışı gözlenmiştir. Bu önemli fark gelişen makine endüstrisinde kalitenin de artışına rol oynamıştır. Kaplamanın göstermiş olduğu bu karakteristik farkla işçilik, aşınan kesici takımın yenisi ile değiştirme süreleri, yeni takılan kesici takımın ayar süreleri gibi etkenler oldukça düşmüştür. Kaplamaların bu denli fark yaratması kesici takımlardaki kaplama konusunda üstünde düşünülmesi ve çalışılması gereken bir durum oluşturmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Metal Kesme Mekanikği

Genelde dövme ve haddeleme gibi hacimsel plastik şekillendirme proseslerini veya döküm proseslerini izleyen metal kaldırma operasyonları istenilen şekillere, boyutlara ve yüzey kalitesine sahip mekanik parçaların üretilmesinde kullanılır.

Bu operasyonlar kesme ve taşlama prosesleri olmak üzere başlıca iki kategoriye ayrılabilir. Kesme operasyonları malzemeden talaş kaldırmak için, taşlama operasyonları da parçaya iyi bir yüzey kalitesi ve hassas boyutlar sağlamak için kullanılır (Aydın, 2014). Şekil 2.1’ de metal kesme mekanikğinin prensibi gösterilmiştir.

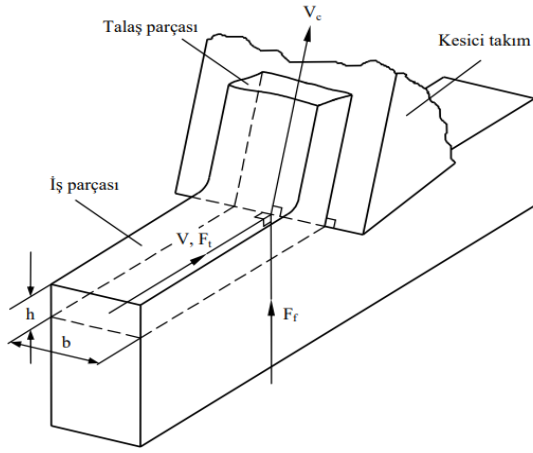


Şekil 2.1. Talaş kaldırma işlemi (Lipski, 2002)

2.1.1. Dik (Ortogonal) kesme mekanikği

Kama şekilli bir takımla ince bir metal katmanının kaldırılması olarak tanımlanan metal kesme karmaşık bir proses olup, genel talaş kaldırma mekanikğini açıklamak için iki boyutlu dik (ortogonal) kesme kullanılır (Altıntaş, 2000).

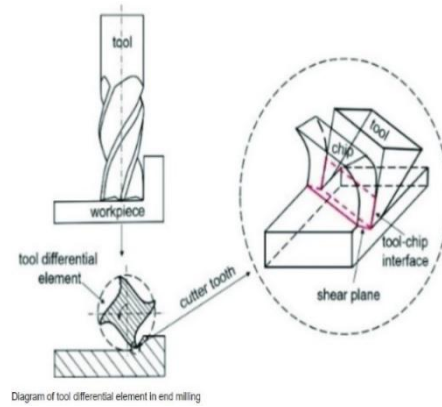
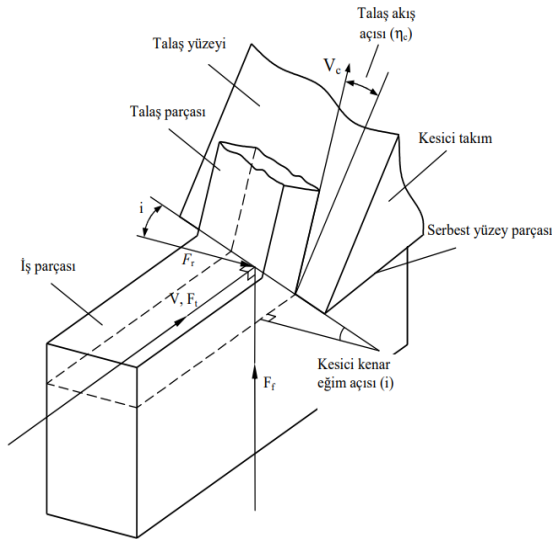
Talaş kaldırma işleminin mekanikği ortogonal kesme ile açıklanabilir. Kesme kenarı ile iş parçası malzemesi arasındaki açı dik olacak şekilde kesme gerçekleştirilir (Duran, 2014). Şekil 2.2’ de kesici takım iş parçasından dik açıyla talaş kaldırmaktadır.



Şekil 2.2. Ortogonal kesme geometrisi (Altıntaş, 2000)

2.1.2. Eğik kesme mekaniği

Eğik Kesme Mekaniği Eğik kesme geometrisi Şekil 2.3’ de gösterilmiştir. Ortogonal kesmede kesme hızı (V) kesici kenara dik olmasına karşın, eğik kesmede normal düzlem ve kesici kenar arasında dar bir eğim açısı (i) bulunmaktadır.



Şekil 2.3. Eğik kesme geometrisi (Altıntaş, 2000)

3. FREZELEME

Kesici takımların dikey eksenini etrafında dönmesi hareketine karşılık, iş parçasının yatayda ilerlemesi ile meydana gelen talaş kaldırma işlemine “frezeleme” denir.

Frezeleme yöntemiyle üzerinde kesici uçlar bulunan kesici takımın kendi eksenini etrafında dönmesi ile iş parçasının bağlı olduğu tablanın x, y ve z eksenlerinde hareket etmesiyle iş parçası üzerinden talaş kaldırılır. Endüstride en yaygın talaş kaldırma şeklidir. Kalıp, otomotiv, havacılık gibi alanlarda çeliğe şekil verilebilmesi için kullanılır.

3.1. Parmak Freze Çeşitleri

Parmak frezeler kullanım yerlerine, işlenecek parçanın geometrisine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin bir kalıp geometrisini ele alalım, işlenecek geometri eğer keskin köşelere sahipse bu tip geometrileri işlemek için düz köşeli freze çakısı kullanılmaktadır. İşlenecek havuz köşeleri yarıçap içeriyorsa ona uygun yarıçap’ ta freze çakısı kullanılır. İşlenecek form kavisli bir yüzeye sahipse küre formunda freze çakısı kullanılır.

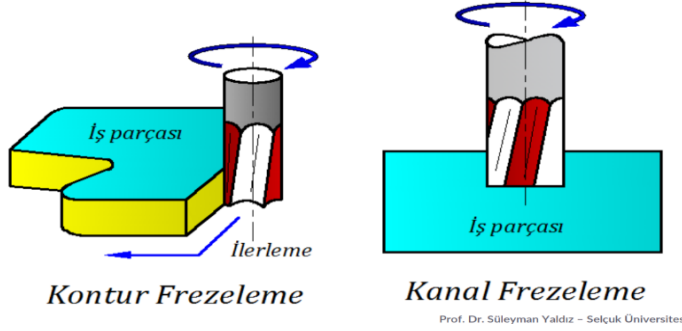
3.1.1. Düz köşeli parmak freze

Bu frezeler genellikle iç ve dış kontör frezeleme operasyonları ya da kanal frezeleme operasyonlarında kullanılır. Yanal kesme mukavemeti yüksektir, makine imalat sektöründe kesme kalıplarında plastik enjeksiyon kalıplarında sıkça kullanılırlar (Şekil 3.1). Freze ucunun keskin olmasından dolayı, havuz boşaltmalarda keskin köşe elde edilmesini sağlarlar. Yüksek yanal kesme performansı yüksektir taban çalışma operasyonlarında performansı daha düşüktür.



Şekil 3.1. Keskin köşeli parmak freze

Şekil 3.2’ de düz köşeli parmak frezenin kanal içi ve kontur kesme işlemi görülmektedir.



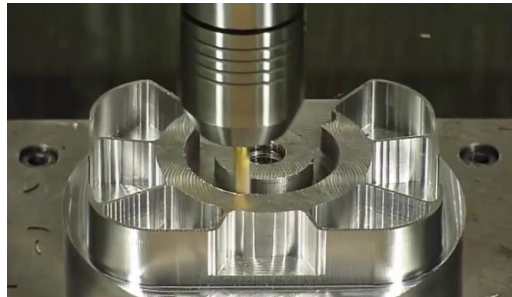
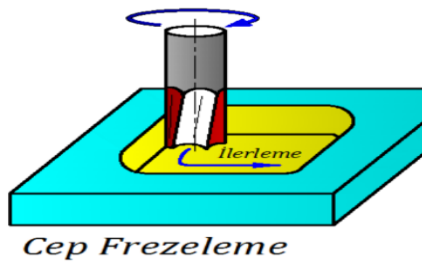
Şekil 3.2. Keskin köşeli parmak freze operasyon örnekleri (Yıldız, 2006)

3.1.2. Köşe radyuslu parmak freze

Bu tür parmak frezelerin düz parmak frezeleme göre farkı köşelerinin keskin olmayıp radyuslu olmasıdır. Bu özelliğinden dolayı genellikle düz frezelere göre köşe aşamalarına karşı daha mukavimdir. Ayrıca havuz boşaltma operasyonlarında keskin köşe istenmeyen durumlarda bu parmak frezeler kullanılır. Kalıp sektöründe en çok kullanılan freze çeşididir. Köşesinin radyuslu olmasından dolayı sivri köşeli frezelere göre daha geç aşınır ve köşe kırılmaları nispeten çok daha azdır. Şekil 3.3’ ve Şekil 3.4’ de parmak frezenin köşelerindeki radyus görülmektedir.



Şekil 3.3. Köşe radyuslu parmak freze



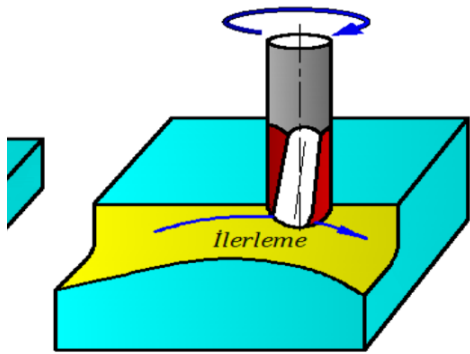
Şekil 3.4. Köşe radyuslu parmak freze operasyon örneği (Yıldız, 2006)

3.1.3. Küre formlu parmak frezeler

Bu tür parmak frezeler karmaşık şekli yüzeylerin kolaylıkla işlenebilmesi için tasarlanmıştır. İşleme yüzeyinde ovalliklerin bulunması, girinti çıkıntılı yapılar özellikle serbest formlu kalıp yüzeyleri bu parmak frezelerle işlenmeye daha müsaittir. En fazla kullanım alanı otomotiv sektöründeki sac kalıpları, otomobil far kalıpları, metal enjeksiyon ve plastik enjeksiyon kalıpları için vazgeçilmez parmak freze çeşididir. şekil 3.5 ve şekil 3.6'da da görüldüğü üzere küre parmak frezeler adını alın kesme kenarlarındaki küresellikten almaktadırlar.



şekil 3.5. Küre formlu parmak freze



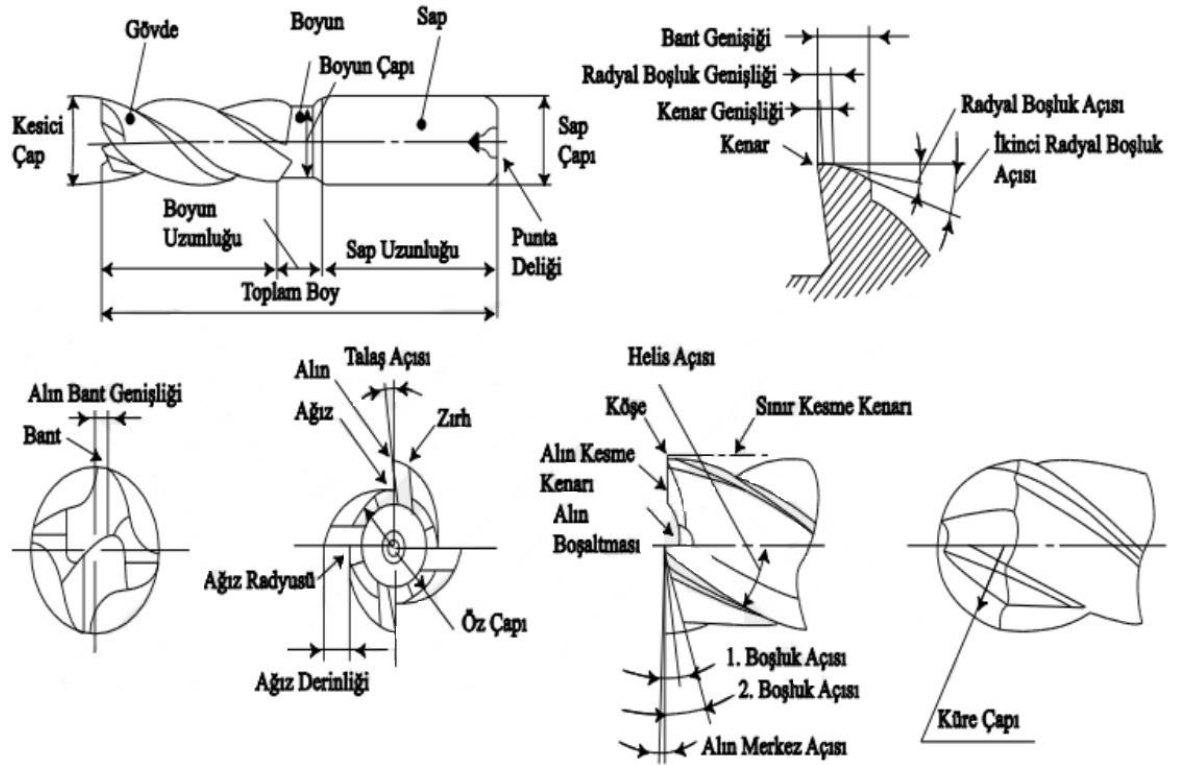
Profil Yüzey Frezeleme



şekil 3.6. küre formlu parmak freze operasyon  rnekleri (Yıldız, 2006)

3.2. Parmak frezelerde geometri

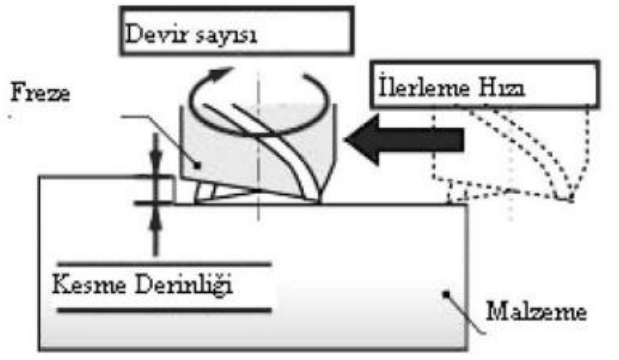
Frezeleme işlemlerinde çeşitli kanalların, yan duvarların ve çevrelerin işlenmesinde en çok kullanılan freze parmak freze diye isimlendirilen kesici takımdır. Parmak frezeler genel geometri olarak birbirlerine yakın değerlerdedir. Birbirlerinden ayrıldığı noktalar işe talaş kaldıracakları çeliğin sertliğine, işlenen parçanın yüzey hassasiyetine göre değişir. Örneğin Şekil 3.7’ de görülen geometride, sert bir çelikten talaş kaldırılıyorsa talaş açısı ‘0’ (sıfır) derecelerde, yumuşak çelikten talaş kaldırılıyorsa 6 derecelerde olmalıdır.



Şekil 3.7. Parmak freze ve elemanları (Seymen, 2009)

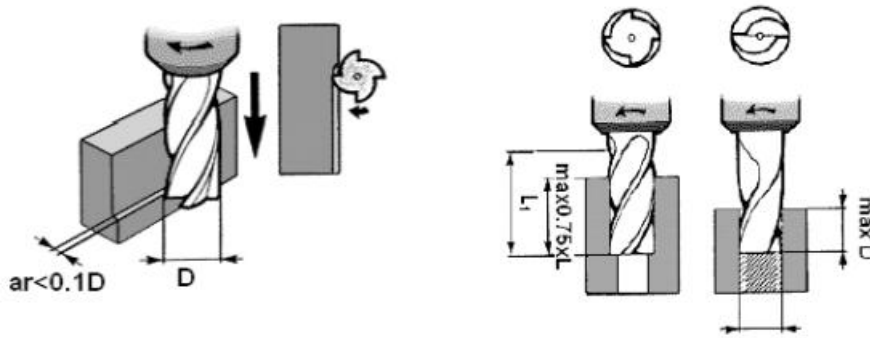
3.3. Frezeleme İşlemi İçin Parmak Frezenin Seçim Kriterleri

Bir frezeleme işleminde en önemli temel parametreler kesicinin devir sayısı, ilerleme hızı ve kesme derinliğidir. İş parçasının cinsi, geometrisi ve yüzey kalitesi vb. faktörler bu temel parametrelerin değerlerini etki etmektedir. Yüzey kalitesinin iyileştirilmesi ve malzeme hakkında çok açık bilginin olmaması durumunda güvenlik açısından düşük kesme derinliği ve ilerleme hızı seçilmelidir (Seymen, 2009). İlerleme hızı, devir sayısı ve kesme derinliği şematik olarak Şekil 3.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Frezelemede üç önemli faktör (Seymen, 2009)

Bir parmak frezenin çalışma aralığı çap ve talaş derinliği kapasitesiyle tanımlanır. Bazı parmak frezeler temel olarak, ek bir derinlik kapasitesine sahip, küçük çaplı, 90°' lik alın frezeler olarak görülebilirler. Bu takımların kapasitelerine işlemin tipi de etkide bulunur. Şekil 3.9’ da maksimum dalma derinliği çarpanı gösterilmektedir.



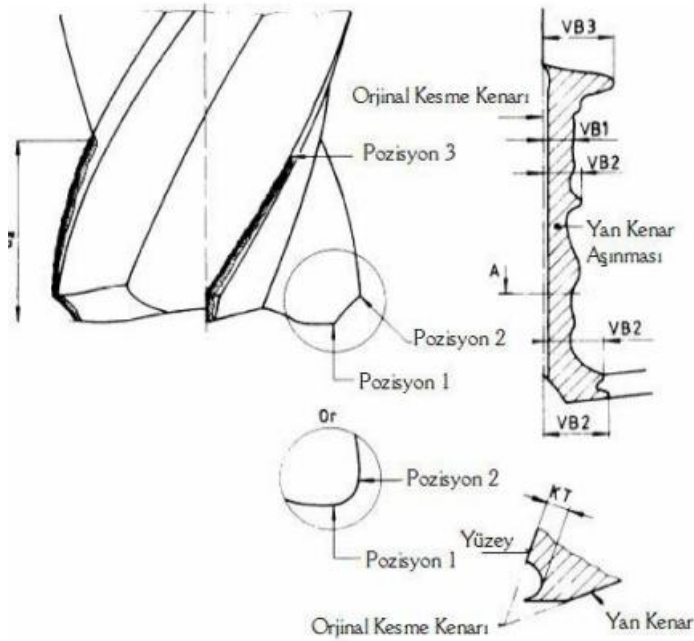
Şekil 3.9. Yan duvar ve fatura işlenmesi (Seymen, 2009)

3.4. Parmak Frezede Takım Aşınması

Aşınma, katı cisimlerin sürtünen yüzeyleri arasında malzeme kayıplarının meydana gelmesidir. Aşınma; kuvvet, kayma hızı, sıcaklık, yağlama durumu, malzeme cinsi ve sertliğinden etkilenen karmaşık bir olaydır. Bu etkilerin bazılarının baskın olması farklı aşınma mekanizmalarını ortaya çıkarmaktadır. Bazı durumlarda, birkaç aşınma mekanizması birlikte etkili olmaktadır (Uçar, 1999).

3.4.1. Parmak frezede takım aşınmasının ölçüm standardı

Bu çalışmada yer alan takım aşınması ölçümlerinde ISO 8658-2 de yer alan “Frezelemede Takım Ömrünün Tespiti” isimli standartlar kullanılmıştır. Bu standart Uluslararası Üretim Araştırmaları Mühendisliği Enstitüsü (CIRP) tarafından geliştirilmiştir. Bu standartta yer alan aşınma türleri Şekil 3.10’da verilmiştir (ISO 8688-2).



Şekil 3.10. Parmak frezelerdeki aşınma biçimleri (ISO 8688-2)

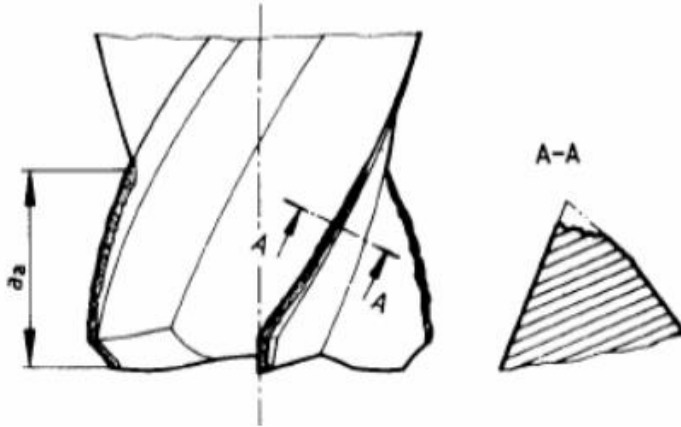
Bu aşınma türlerini sınıflayacak olursak;

Yan Yüzey Aşınması (Vb)

Kesici takımın yan kenarlarında aşamalı olarak kesme esnasında gelişen aşınma bölgesidir.

1. Düzenli Yan Yüzey Aşınması (VB1)

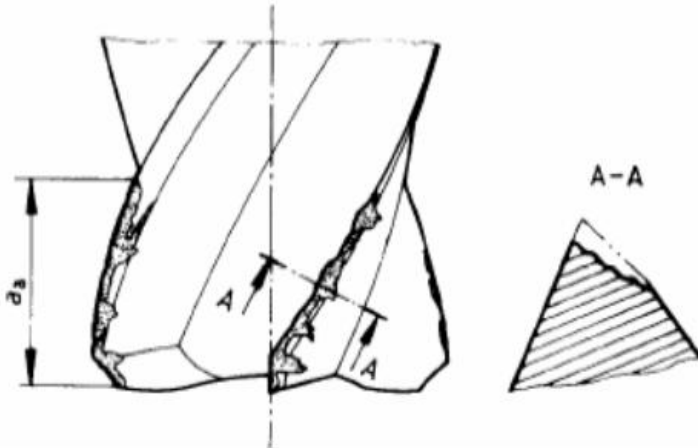
Takımın aktif kesme kenarı boyunca düzenli olarak sabit genişlik ve uzunluktaki aşınma türleridir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Düzenli yan yüzey aşınması (VB1) (ISO 8688-2)

2. Düzenli Olmayan Yan Yüzey Aşınması (VB2)

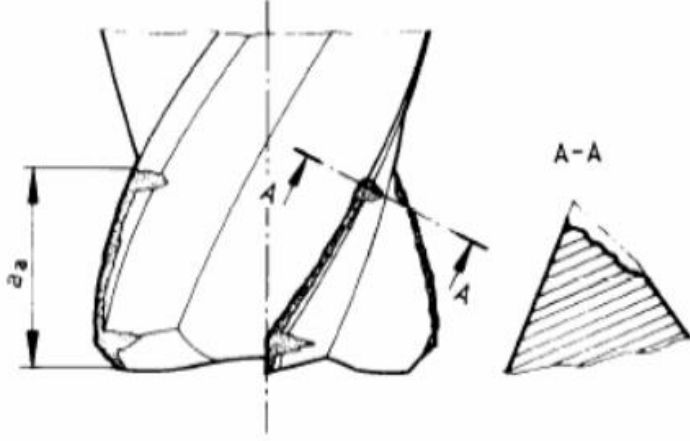
Yan yüzeyin aktif kısmının her pozisyonda ölçülen aşınmanın düzensiz olarak ilerlediği aşınma türüdür (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Düzenli olmayan yan yüzey aşınması (VB2) (ISO 8688-2)

3. Bölgesel Yan Yüzey Aşınması (VB3)

Takımın yan kenar kısmında abartılı ve bölgesel olarak gelişmiş aşınma türüdür (Şekil 3.13).



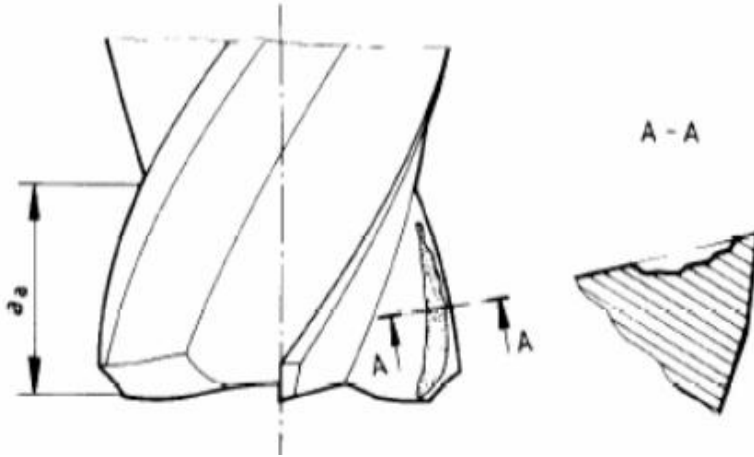
Şekil 3.13. Bölgesel yan yüzey aşınması (VB3) (ISO 8688-2)

Krater Aşınması (KT)

Kademeli olarak takımın kesme anında iç yüzeyinde oluşan aşınma biçimidir.

1. Krater Aşınması (KT1)

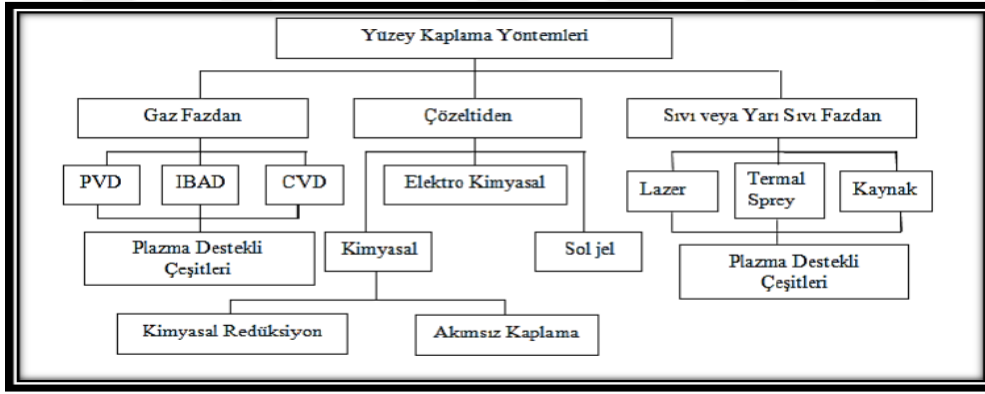
Kesme kenarına paralel olarak takımın iç yüzünde kademeli olarak oluşan krater şeklindeki aşınmadır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Krater aşınması (KT1) (ISO 8688-2)

4. KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Günümüz teknolojisinde, tek yapıda olan malzemelerden bazı özellikler karşılanamamaktadır ve bu sebeple kombinasyona sahip malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır (Türküz, 2006). Bu amacı gerçekleştirebilmek amacıyla kaplama tekniklerinden yararlanılmaktadır (Türküz, 2006). 1838 yılında ilk ince film, “elektroliz” yöntemiyle elde edilmiştir. 1852 yılında Bunsen, “kimyasal reaksiyon” yöntemiyle, Faraday “asal gaz içerisinde buharlaştırma” yöntemiyle, Nahrwold ve Kundt “Joule ısıtması” yöntemiyle yine ince film elde etmişlerdir. Şekil 4.1’ de kaplama yöntemlerinin genel şablonu görülmektedir.



Şekil 4.1. Kaplanacak malzemenin bulunduğu fiziksel duruma göre kaplamaların sınıflandırılması (Şafak, 2008)

Buhar fazında yapılan kaplama teknikleri, altlık malzemesine veya kaplamaya herhangi bir sınırlama getirmeden yüksek nitelikte kaplamalar elde etmeyi sağlamaktadır (Sönmezoğlu ve ark., 2012).

Kaplama proseslerinden kimyasal buhar biriktirme ve fiziksel buhar biriktirmeyi kapsayan buhar proseslerinde, buharın meydana getirdiği kinetik enerjiden faydalanılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmektedir (Alsaran ve ark., 2002). Gaz halinde yapılan kaplama yöntemlerinden olan PVD (fiziksel buhar biriktirme) yöntemi, endüstride en yaygın kullanım alanına sahip yöntemdir (Doğan, 2001).

4.1. PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) Yöntemi

Balzers tarafından 1979 yılında ilk PVD takım kaplama uygulaması gerçekleştirilmiştir. İlk olarak bir yüksek hız çeliği matkap ve kılavuz takımı kaplanmıştır ve yöntemin uygulanışı daha sonra diğer takımlara da uygulanmıştır. 1980' li yılların başından beri PVD kaplama uygulamaları sanayide sıklıkla kullanılmaktadır (Kıyak ve ark., 2003). Uygulanma kolaylığı, ölçüsel tolerans değişikliğine gerek duyulmaması, taban malzemenin mikro yapısına zarar vermemesi, vb. özelliklerinden dolayı fiziksel buhar biriktirme kaplama yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır (Aytaç ve ark., 2016).

Bazı PVD yöntemi ile yapılan kaplama uygulamalarına ait fiziksel özellikler Tablo 4.1' de gösterilmiştir.

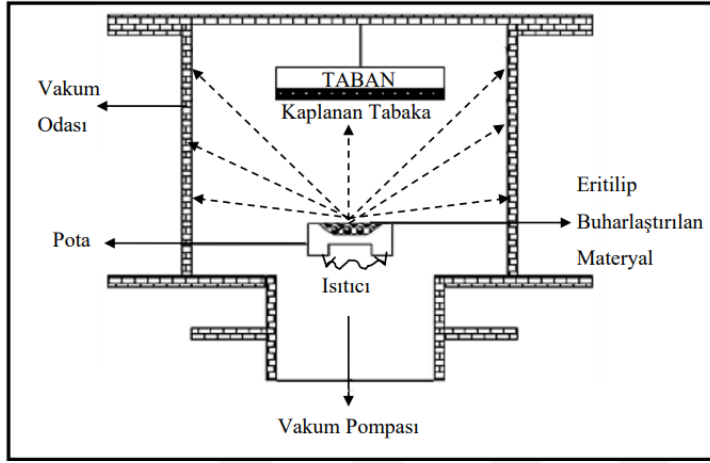
Tablo 4.1. PVD yöntemi ile yapılan kaplamalara ait fiziksel özellikler (Aytaç, Uğur, 2018)

Kaplama	Kaplama Kalınlığı (μm)	Mikro Sertlik (HV 0.05)	Sürtünme Katsayısı	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Biriktirme Sıcaklığı (°C)
TiN	2-4	2800	0.55	450	425
TiCN	2-4	2800	0.15-0.3	300	425
TiCrN	4-6	2200	0.55	500	425
AlTiN	2-4	3500	0.55	700	450
AlTiCrN	3-8	3200	0.55	850	450-550
AlCrN	2-4	3000	0.55	1050	450-550
CrN	4-6	2300	0.55	700	150-400
Cr ₂ N	2-5	1500-2800	0.55	700	150-400
CrWN	5-8	3000-3200	0.3	800	350
a-C:H:W	4-6	1600	0.2	350	160 - 250
a-C:H:W	+3 - 5	2000 - 2800	0.1	300	160 - 250
a-C:H					
CrN + a-C:H	2 - 5	2000 - 2800	0.1	300	200 - 250
a-C:H	1 - 3	2000 - 2800	0.1	300	160 - 250
B ₄ C	1 - 3	3400	0.55	800	200
TiCN + MoS	2 - 4	3000 + 2000	0.06	500	425 / 150

4.1.1. Buharlaştırma ile PVD kaplama yöntemleri

Buharlaştırma yöntemi, en eski kullanıma sahip ve en sık kullanılan vakum biriktirme yöntemlerinden biridir (Savaş, 2004). Şekil 4.2' de görülen bu yöntemde, ince bir film halinde kaplama yapmak istediğimiz malzeme, öncelikle buharlaşması için gereken sıcaklığa kadar ısıtılır (Sönmezoğlu ve ark., 2012).

Buharlaştırma sürecinde kaplama malzemesi, kaynak malzemesini (katodu) belirli bir sıcaklığa (1000-2000 °C), vakumda ($10^{-8} - 10^{-2}$ torr) ısıtmakla meydana getirilir. Bu şekilde buhar basıncı ($> 10^{-2}$ torr), çevreleyen oda basıncını geçer ve yoğunlaşma için gerekli buharı üretebilir (Savaş, 2004). Isıtma ile buharlaştırılan bu malzemeler daha soğuk bölgelerde alt taşlar üzerine taşınıp yoğunlaştırılırlar. Bu işlem ile buharlaştırma gerçekleşmiş olur (Sönmezoğlu ve ark., 2012).



Şekil 4.2. Buharlaştırma yönteminin şematik gösterilişi (Gündüz ve ark., 2005).

4.2. PVD Tekniğinde Kullanılan Başlıca Kaplama Malzemeleri

Mevcut bilimsel çalışmalar incelendiğinde PVD yöntemiyle genelde Ti, TiN, TiC, TiCN, TiAlN, TiAlCN, TiB, TiSiCN, AlTiN, TiZrN, TiBN, CrN, CrCN, CrN / TiN, Cr-AlN, MoV, MoS₂, MoS₂-Ti, Al₂O₃, ZrN, NbN, WC/Co kaplamalar yapılarak aşınma davranışlarının incelendiği gözlemlenmiştir. Yapılan firma araştırmaları neticesinde Türkiye şartlarında PVD yöntemiyle yapılan kaplama türleri; TiN (Titanyum nitrür), CrN (Krom nitrür), CrCN (Krom karbonitrür), TiAlN (Titanyum alüminyum nitrür), ZrN (Zirkonyum nitrür) kaplamalar olarak sıralanabilir (URL-1; URL-2; URL-3; URL-4; 2024). Tablo 4.2' de kaplama özellikleri, yapısı, sürtünme katsayısı gibi değerler gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Bazı ince sert film kaplamaları ve özellikleri (Gündüz ve ark., 2005)

Kaplama Özellikleri	Kaplamalar						Özel Kaplamalar		
Kaplama Malzemesi	TiN	TiCN	TiCN-MP	TiAlN	AlTiN	ZrN	CrN	CBC	TiAlCN
Kaplama Yapısı	Tekli	Çoklu	Çoklu	Tekli	Tekli	Tekli	Tekli	Çoklu	Çoklu
Sertlik (GPa)	24	37	32	35	38	28	18	20	28
Sürtünme Katsayısı	0,55	0,2	0,2	0,5	0,7	0,55	0,3	0,15	0,25
Kaplama Kalınlığı (µm)	1-5	1-4	1-4	1-4	1-3	1-4	1-4	0,5-2	1-4
Sıcaklık (°C)	600	400	400	800	800	600	700	400	500
Kaplama Rengi	Altın Sarısı	Mavi-Gri	Parlak Kırmızı	Mene kşe	Mavi-Siyah	Açık Sarı	Gümü ş	Kömür Grisi	Kırmızım sı Bakır

4.2.1. ZrN (Zirkonyum Nitrür) kaplama

Zirkonyum nitrür kaplama, TiN kaplama ile benzer özelliklere sahip bir kaplama çeşididir (Şafak, 2008). ZrN kaplamanın en önemli özelliği insan vücuduna biyolojik olarak en uygun kaplama çeşidi oluşudur. Bu sebeple tıbbi implantlarda özellikle tercih nedenidir (Şafak, 2008). ZrN kaplamanın özellikleri Tablo 4.3’ de verilmiştir.

Tablo 4.3. Zirkonyum nitrür kaplamanın özellikleri (Şafak, 2008)

Kimyasal Bileşimi	ZrN
Sertlik (HV 0,05)	2800 ± 200
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	600
Sürtünme Katsayısı	0,61
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra µm)	0,2
Kalınlık (µm)	2-3
Renk	Açık Sarı

4.2.2. AlTiN (Alüminyum Titanyum Nitrür) kaplama

AlTiN kaplama kesme kalıpları, aşınmaya maruz kalmış malzemeler ve çoğunlukla demir, çelik vb. metaller için yapılan genel bir kaplamadır. Genellikle günlük hayatta frezelerde kesme bükme kalıplarında ve matkap uçlarında kullanılır.

Yapılan çalışmalar göre TiN kaplama parçanın 3-30 kat ömrünü artırır. TiN kaplama

çok sert bir kaplamadır ve düşük ısıl geçirgenliğe sahiptir. Bu yüzden ısı iletimini engeller. Isı iletimi engellendiği için takımların işlem sırasında aşırı ısınmasını ve sertliğin düşmesini engeller, krater oluşumunu ve serbest yüzey aşınmasını azaltır. Kimyasal bir reaksiyon oluşmadığından dolayı korozyon ve oksidasyon gerçekleşmez.

4.2.3. AlCrN (Alüminyum Krom Nitrür) kaplama

AlCrN Kaplama, metal şekillendirmede de çok aranan bir kaplamadır. Özellikle sıvama kalıpları, metal ve plastik enjeksiyon kalıpları ve plastik kalıplarında çok iyi sonuçlar alınmaktadır. Kaplamanın düşük sıcaklıklarda yapılır. Bu nedenle kaplamalarda çarpılmalar meydana gelmez. AlCrN ise oldukça küçük tane boyutuna sahip olması yüksek alüminyum içeriği sebebiyle yüksek sıcaklıkların olduğu kesici takım uygulamalarında yüksek sıcak sertlik ve aşınma dayanım oluşturur. Bu nedenle birçok kuru ve yüksek hızda kesme işlemlerine uygundur. Özellikle uzun talaş oluşturan tokluğu yüksek alaşımların talaşlı imalatında çok verimlidir. İçeriğindeki Krom Nitrür yapısı nedeniyle yüksek oranda basma iç gerilmesine sahiptir ve bundan dolayı tokluğu AlTiN olan kaplamalardan daha yüksektir. Bundan dolayı sert sac kesme kalıplarında da başarılı sonuçlar vermektedir. Sıcaklık dayanımından dolayı alüminyum ve zamak enjeksiyon kalıplarına uygundur (Yüksel, 2023).

4.2.4. TiSiN (Titanyum Silisyum Nitrür) kaplama

Nanokompozit özellikte bir kaplamadır. Geleneksel PVD kaplamaların tane boyutları kaplama cinsine bağlı olarak 30-80 nanometre aralığındayken, nanokompozit kaplamaların tane boyutları genellikle 10 nanometre civarındadır. Bu nedenle geleneksel PVD kaplamaların elektron mikroskobu kesit fotoğraflarında görülen kolonsal tane yapısı nanokompozit kaplamalarda görülmez; yapı amorf benzeri bir görünüme sahiptir.

Nanokompozit kaplamalar 1000 °C üzeri çalışma sıcaklıklarında bile sertlik kaybı ve kimyasal bozunma olmaksızın kullanılabilir özellikleri vardır. Çok yüksek sıcaklıklarında olduğu kesme sıvılarının kullanılmadığı kuru kesme uygulamalarında, sert takım çeliklerinin yüksek hızda işleminde kullanılan kesici takımlarda ve takım üzerinde yüksek sıcaklıkların olduğu uygulamalarda başarıyla kullanılabilmektedir (Yüksel, 2023).

5. METERYAL ve METOD

5.1. Deneyisel Çalışmada Kullanılan Tezgah, Cihaz Ve Malzemeler

5.1.1. Freze tezgahı

Deneyde kullanılan freze tezgahı (Şekil 5.1) NC kontrollü, açık kabinli bir tezgahdır. Deney numunesine yakından müdahale ederek, sıcaklık ölçümü ve termal görüntü alabilmek için standart kapalı kabinli CNC tezgahı tercih edilmemiştir. Numune işleme operasyonu sadece tek eksen ve lineer bir işlem olduğu için NC kontrol yeterli gelmektedir. Tezgahın mekanik rijitliği de yeterlidir. Çelik numunenin NC tezgaha rijit şekilde bağlanması için taşlanmış çeneli hassas mengene kullanılmıştır.



MODEL SZ-2200VSD-NC			
SPINDLE	Spindle speed of Vertical	rpm	60-3600
	Spindle taper		NST 40/BT40
	Swivel angle of head	mm	45
	Overarm travel	mm	140
	Quill feed per revolution of spindle	mm	0,035/0,07/0,14
TABLE	Table size	mm	1350x305
	T-slots	mm	16x3x63
	Maximun table load	kgs	500

Şekil 5.1. Deneyde kullanılan NC kontrollü Freze tezgahı (URL-9, 2025)

Deneyde numune işleme sırasında malzemenin ve parmak frezenin sıcaklığının sağlıklı olarak ölçülebilmesi için herhangi bir soğutma sıvısı veya gazı kullanılmamıştır.

5.1.2. Termal ölçüm cihazı

Talaş kaldırma ve sürtünmeden kaynaklı olan sıcaklığın termal görüntüsü için Testo 875-2i cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.2). Termal kamera ile işlenen çeliğin, parmak frezenin, kaldırılan talaşın termal görüntüsünü almak için kullanılmıştır.



İnfrared görüntü çıkışı	
Görüş alanı	42° x 30°
Odak	sabit odaklı
Min. odak mesafesi	<0,5 m
Geometrik çözünürlük (IFOV)	2.3 mrad
Görüntü yenileme oranı	9 Hz
İnfrared çözünürlük	320 x 240 pixel
SuperResolution (IFOV)	1.3 mrad
SuperResolution (Piksel)	640 x 480 piksel
Termal duyarlılık	<0.05 °C (50 mK)
Spektral aralık	7,5 ... 14 µm
Görüntü çıkış görseli	
Min. odak mesafesi	min. 0.5 m
Görüntü boyutu	5 MP

Şekil 5.2. Testo 875-2i model termal kamera cihazı (URL-10, 2025)

5.1.3. Kızılötesi termometre

Deney sırasında işlenen çeliğin ve parmak frezinin sıcaklığını ölçerek kayıt altına almak en önemli verilerden biridir. Operasyon bitiminde zaman kaybetmeden ve parçalar soğumadan anlık sıcaklık ölçümü için hızlı sonuç veren Unit UT306S serisi kızılötesi termometre kullanılmıştır (Şekil5.3). Lazerli özelliği sayesinde noktasal ölçüm alabilmeyi mümkün kılmaktadır.

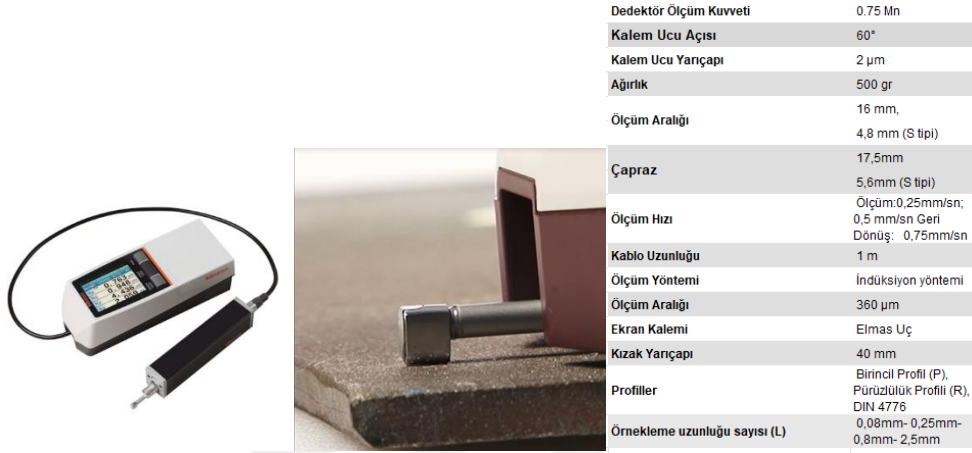


Unit UT306S Serisi Kızılötesi Termometre	
Sıcaklık aralığı	-50°C ~ 500°C
Keskinlik	±2°C veya ±2%
Çözünürlük	0,1°C
Mesafeden noktaya oranı	12:1
Tepki Süresi	≤250ms
Emisivite	0.10~1.00 Ayarlanabilir
Lazer sınıfı	Sınıf 2
lazer gücü	<1mW
lazer dalga boyu	630nm ~670nm
Spektral cevap	8µm~14µm

Şekil 5.3. Unit UT306S serisi termometre cihazı (URL-11, 2025)

5.1.4. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

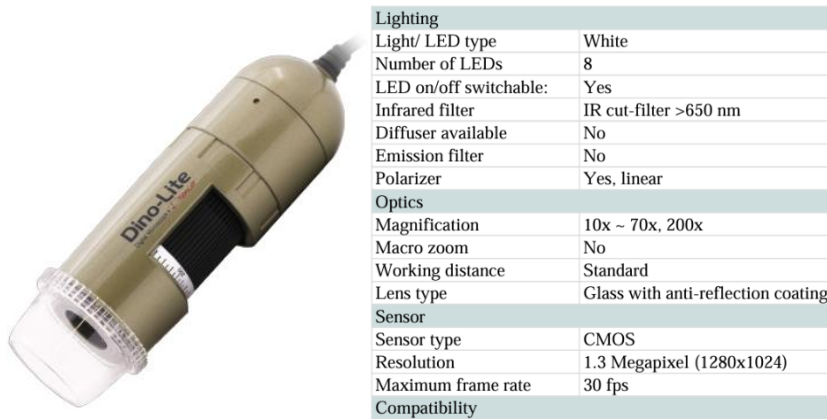
Farklı parmak frezelerle işlenen çeliğin, yüzey pürüzlülüğünü incelemek için kullanılan mitutoyo marka Surfes SJ-210 model yüzey ölçüm cihazıdır (Şekil 5.4). Yüzey pürüzlülüğü ölçümü, farklı helislerde ve kaplamadaki parmak frezelerin işlenen çelikteki yüzey pürüzlülük değerlerini nasıl değişkenlik gösterdiğini anlamamız açısından gereklidir.



Şekil 5.4. Mitutoyo 'Surfes SJ-210 yüzey ölçüm cihazı ve ölçüm iğnesi (URL-12, 2025)

5.1.5. Dijital mikroskop

Parmak frezelerin üretiminden hemen sonra üretim hatalarına bağlı olarak oluşan mikro kırıkların, yüzeysel hataların, deformasyonların gözle tespiti mümkün olmamaktadır. Bu gibi hataların fark edilememesi sonucunda yüksek sıcaklıklarda kaplama yapılması durumunda hatalı bir üretim söz konusudur. Dijital mikroskop, görülemeyen hataların 50-100 kat büyütme oranı sayesinde büyütülerek görüntülenmesini sağlar (Şekil 5.5). Ayrıca kaplama sonrasında kaplama hatalarının tespiti ve görsel muayene için de kullanılmıştır.



Şekil 5.5. Dino-Lite Premier AM4113ZT dijital mikroskop (URL-13, 2025)

5.1.6. 5 Eksen CNC taşlama tezgahı

Parmak frezelerin imalatı için gerekli olan tezgahdır. 5 eksen hareketi sayesinde ileri düzeyde işleme olanağı sağlar. CNC kontrollü olması, tezgah üzerinde bulunan hassas eksen cetvelleri sayesinde 0,002mm hassasiyette kesici takım imalatı yapmak mümkün kılmaktadır. Şekil 5.6’ daki tezgah servo kontrollüdür. Windows tabanlı işletim sistemine sahiptir. İşleme sırasında işlenen parça üzerine 6bar basınçlı mineral yağ püskürterek, taşlama işlemi sırasında sürtünmeden dolayı oluşan parçanın ısınmasını engelleyerek üretilen kesici takımın kalitesini yükseltir.

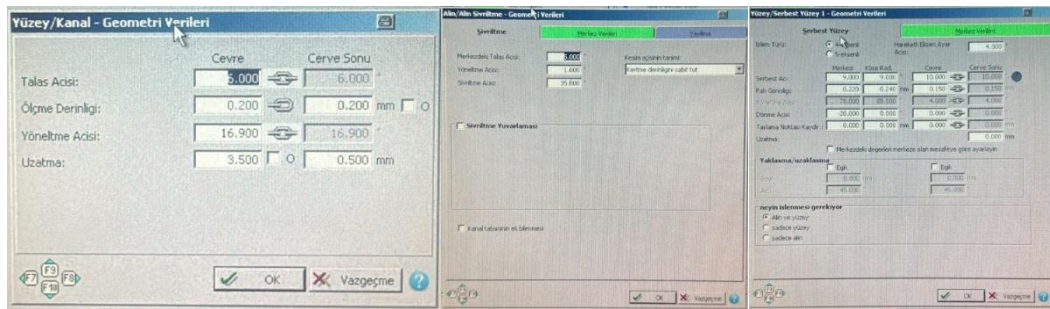


Şekil 5.6. Michael Deckel marka Flexus S22 model taşlama tezgahı (URL-14, 2025)

Flexus S22 versiyon yazılıma sahiptir. Bu yazılımla, parmak freze, matkap, kılavuz üretilmektedir. Yazılım takım imalatı için oluşturulmuş başarılı bir arayüze sahiptir.

Tasarım esnekliği sağlayan bu yazılım oluşturulan tasarımın CAM satırlarını de kendisi yazmaktadır. Tezgahdaki arayüz sayesinde kesici takım imalatında tüm ölçüleri istenilen şekilde değiştirmek mümkündür.

Aşağıdaki görselde, tezgah içerisindeki tasarım programına ait bazı resimler gösterilmiştir. İstenilen takım geometrisi için aşağıdaki görsellerdeki boşluklara değerler yazılır ve tezgaha hesaplatma işlemi yapılır. Bu kısımda önemli olan iyi bir kesici takımın önceden optimum koşullar için tasarlanmış olması gerekmektedir. Ardından değerler tezgaha girilerek üretime başlanır.



Şekil 5.7. Flexus S22 CNC tezgahın tasarım parametreleri sayfaları

5.2. Deneyde Kullanılan 1040 Çeliğinin İşleme Operasyonu

Şekil 5.8' de deneyimizde kullandığımız 1040 çeliği görülmektedir ve ölçüleri 30mmx30mmx100mm' dir. Ölçü seçimi için özel bir hesaplama yapılmamış olup, NC freze tezgahındaki mengeneyle parçanın bağlanabilmeye uygun olması yeterlidir.



Şekil 5.8. Operasyonlarda kullanılan 1040 çeliğinin görseli

NC freze tezgahına bağlanan elik malzeme hassas mengene ile tezgaha sabitlendi, ardından düzlük kontrolü için komparatör saatiyle düzeltme işlemi yapıldı. Ürettiğimiz parmak freze bir pens yardımıyla tezgaha bağlandı. Ardından tezgah değerleri 3600dev/dak olarak ilerleme hızı da 1000mm/dk olarak ayarlandı. Burada gösterilen devir ve ilerleme hızları seçimimiz, parmak frezeleri kırmadan ama zorlayarak çalıştırmak içindir. Zorlamamızın nedeni ise, kaplama aşınmasını görebilmek içindir. Ardından 1040 eliği talaş kaldırma işlemine geçildi.

Yanal pasoda 0,5mm talaş derinliği verilerek, Z derinliği de 15mm olarak ayarlandı. Toplam yanal paso 5mm olacak şekilde, 10 tekrar program yazıldı ve start verildi.

İlk olarak 10 derece ve ZrN kaplı parmak freze tezgahın tutucusuna bağlandı ve talaş kaldırma işlemi başlatıldı. İşlem sonunda lazer termometre ile ölçüm alınarak hem parçanın hem de parmak frezenin sıcaklık değerleri ölçüldü. Ayrıca atılan talaşlardan numune alınarak fotoğraflandı.



şekil 5.9. Parmak freze ve 1040 çeliğinin bağlanmış hali

Toplamda 5mm paso verildi ve zaman kaybetmeden kızılötesi termometre ile ölçüm alındı. Bu operasyonda hem parçanın hem de parmak frezenin sıcaklığı alınmıştır.



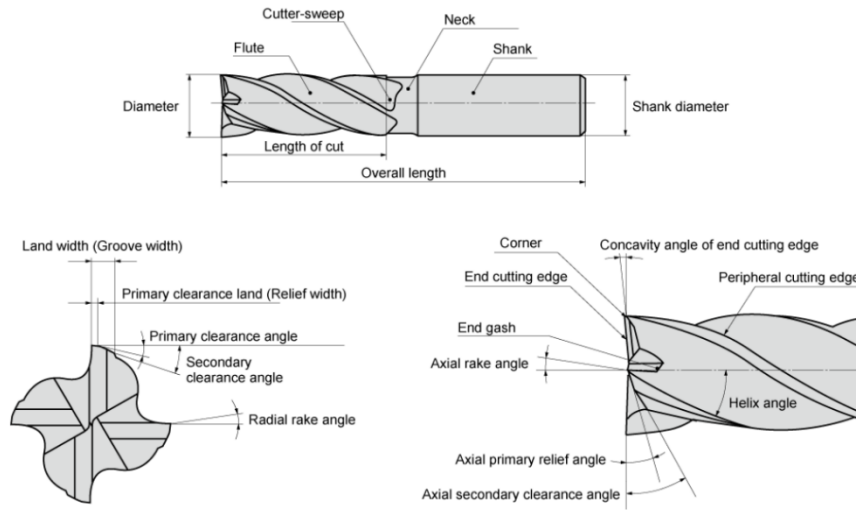
Şekil 5.10. İşlem sonunda çeliğin lazerli sıcaklık ölçümü ve termal görüntüsü

Her bir parmak freze için 1 adet numune çelik kullanılarak her bir koşul eşitlenmiş oldu.

Bu operasyonlar tüm parmak frezeler için ayrı ayrı yapılmıştır. İşlemler sırasında atılan talaş görsellerinin geometrisi ve renkleri de farklılık göstermiş olup bazı talaşlar metal rengini korurken bazı talaşlar meneviş rengini almış ve bazı talaşlar da yüksek ısıyı üstüne alarak kahverengine dönmüştür.

5.3. Deneyde Kullanılan Parmak Frezelerin İşlenmesi

Deneyde kullanacağımız WC parmak frezelerin tasarımını tamamladıktan sonra Flexus S22 programı ile CAM programlanması yapıp ardından makine üzerine veriler girildi. Tüm numune frezeler için kesme parametreleri aynıdır. Sadece helis açıları programdan 10, 30, 50, 60 derece olarak değiştirilerek üretilmiştir. Bu tezle yapılmak istenen farklı helis açılarının karakteristiğini ölçmek olduğundan, parmak freze üzerindeki tüm kesme değerleri sabit tutulup helis açıları değiştirilmiştir. Her bir kaplama ve her bir helis açısı için toplamda 16 adet numune freze işlenmiştir.



Şekil 5.11. Düz ağızlı frezeler için açı ve yüzey gösterimleri (URL-16, 2025)

Tablo 5.1’ deki değerlere bağlı kalarak ürettiğimiz parmak frezelerdeki tek değişken helis açıları kısmı olmuştur. Tablodaki helis açısı 10° olarak gösterilen değer, diğer numunelerde 30° , 50° , 60° olarak değişkenlik göstermektedir.

Tablo 5.1. Üretilen numune parmak frezelerin ölçü değerleri

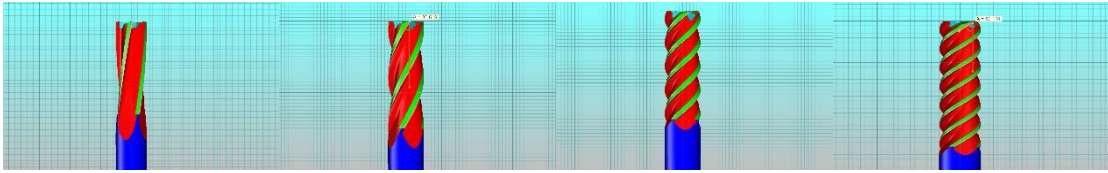
DENEY İÇİN ÜRETİLEN PARMAK FREZENİN TASARIM DEĞERLERİ		
Helix angle	Helis Açısı	10°
Length of Cut	Yanal Kesme Kenarı Uzunluğu	20mm
Diameter	Takım Kesme Çapı	12mm
Shank Diameter	Pens Çapı	12mm
Neck	Boğaz Düşürme Çapı	12mm
Helix	Kesme Ağızı Adedi	4 Adet
Land Width	Kesme Kenarı Toplam Genişliği	1,2mm
Primary Clearance Land (Relief Width)	1. Serbest Yüzey Genişliği	0,4mm
Primary Clearance Angle	1. Serbest Yüzey Açısı	$10,5^\circ$
Secondary Clearance Angle	2. Serbest Yüzey Açısı	27°
Rake Angle	Kesme Kenarı Talaş Kepçeleme Açısı	6°
End Gash	Alın Sivirtme Açısı	35°
Axial Rake Angle	Alın Sivirtme Kepçeleme Açısı	5°
Concavity Angle	Alın Kesme Ağızı Merkez Açısı	$2,5^\circ$
Axial Primary Relief Angle	1. Alın Serbest Yüzey Açısı	8°
Axial Secondary Clearance Angle	2. Alın Serbest Yüzey Açısı	20°

Şekil 5.12’ de, Tablo 5.1’ de girilen kesme açılarının ve değerlerin sonucunda oluşturulan tasarım görülmektedir.



Şekil 5.12. Flexus S22 de programın arayüzü

Frezelerin işlenebilirliğinin hesabı yapılmış, üreteceğimiz 10°, 30°, 50°, 60° helis açılı tüm frezelerde bu işlem uygulanmıştır. Şekil 5.13’ de yapılan tasarımlar gösterilmiştir.



Şekil 5.13. 10°, 30°, 50°, 60° derece frezelerin tasarımları

Karbür çubuk taşlama tezgahına bağlanarak elmas taş seti ile işlendi. Elmas çubuklar H6 toleransına göre imal edilmişlerdir. Yani dış çapı 12mm olarak söz ettiğimiz frezenin gerçekte dış çapı 11,995mm gelmektedir. Şekil 5.14’ te işleme operasyonları görülmektedir.



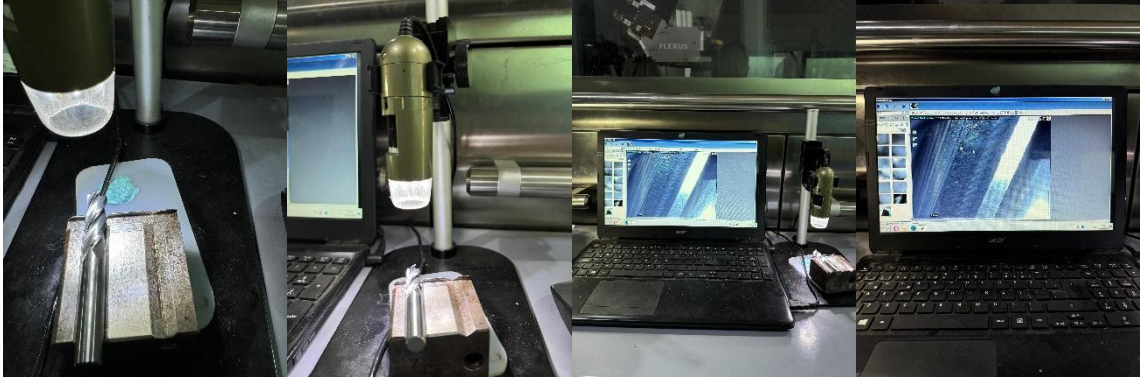
Şekil 5.14. Karbür çubuğun CNC taşlama tezgahında elmas taş seti ile işlenmesi

Bu işleme süresince taşlamadan dolayı karbürün aşırı ısınıp kimyasal yapısının bozulmaması için, soğutma yağı karbür parça üzerine püskürtüldü. Ayrıca taşlama sırasındaki tungsten karbür talaşları da kesme bölgesinden taşlama yağı ile uzaklaştırılarak yüzeyin daha pürüzsüz şekilde çıkmasını sağlar.

Taşlama işleminin sonucunda çıkan numunenin Şekil 5.16' da ölçüsel ve mikroskobik görüntüleri alındı. Hassas işlenmiş ve tam ölçüsel doğruluğa getirilmiş frezelerin kaplama öncesi görsel yapısı Şekil 5.15' te gösterilmiştir.



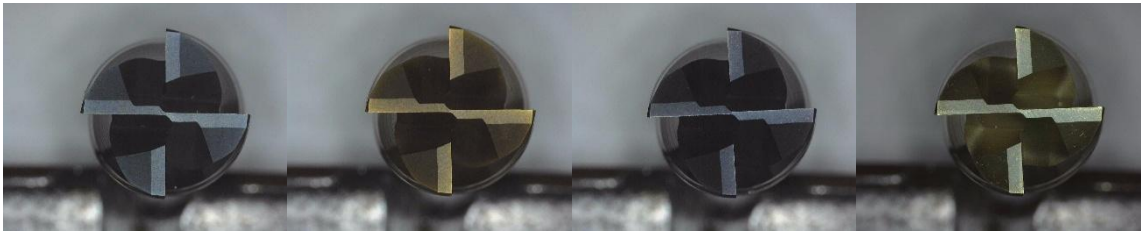
Şekil 5.15. 10°, 30°, 50°,60° numuneler



Şekil 5.16. İşlenen numunelerin mikroskobik görüntüleri

Tüm numuneler hazır olduktan sonra bir sonraki aşama olan kaplamaya geçilmiştir. Kaplama işlemi özel bir proses olduğundan işin uzmanları tarafından yapılmıştır. Her bir kaplama firmasının özel ve gizli reçeteleri bulunduğu için, firma içerisinde fotoğraf çekimine izin verilmediğinden bu kısım ile alakalı görsel konamamıştır. Bu aşamada frezelere ZrN, TiSiN, AlTiN, AlCrN kaplatıldı. Burada kaplama işlemiyle frezelere farklı fiziksel özellik sağlanması amaçlandı. Kaplama kesici takımlarda kesme ve ömür performansını %20 ile %30 arasında arttırmaktadır. Kaplanmış kesici takım talaş kaldırma sırasında aşınma direnciyle karşılaşır. Kaplama sayesinde aşındırma kuvvetlerine ilk maruz kalan kısmı kaplamadır. Bu sayede WC parmak frezedeki hasar kaplama tarafından sönümlenmiş olur. Bu da takım ömrünün artmasını sağlar.

Şekil 5.17’ de görüldüğü gibi frezelerdeki kesme ağızları 4 adet olarak tasarlanmıştır. Deneyimiz için bu ağız sayısı uygun görülmüştür.



Şekil 5.17. Sırasıyla 30° AlCrN, TiSiN, AlTiN, ZrN kaplanmış numunelerin alın görüntüleri

Şekil 5.18’ de kaplama sonrası alınan görüntüler gösterilmektedir.



Şekil 5.18. Sırasıyla 30° AlCrN, TiSiN, AlTiN, ZrN kaplanmış numunelerin yanal görüntüleri

5.4. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

5.4.1. 1040 çeliği

Deneyde işlemek için 1040 çeliği kullanılmıştır. Endüstride en çok kullanılan malzemedir.

1040 imalat çeliği, mukavemeti ve işlenebilirliği bir arada sunan önemli bir malzeme olarak öne çıkar. Orta karbonlu çelikler, düşük karbonlu çeliklere göre daha yüksek sertlik ve dayanıklılık sağlar. Aynı zamanda yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. 1040 çelik türünün mukavemeti, genel olarak çekme mukavemeti olarak ifade edilir ve yaklaşık 580-700 MPa arasında değişir. Akma mukavemeti ise 320 MPa olarak değerlendirilir. Bu değerler, çeliğin çeşitli endüstriyel uygulamalarda güçlü ve dayanıklı parçaların üretiminde kullanılmasını sağlar. 1040 çelik türü, kolay işlenebilir olması ile de dikkat çekmeyi başarır. Isıl işlem yapılarak çeşitli sertlik seviyelerine getirilebilir ve çeşitli uygulamalara uygun hale getirilerek kullanılması mümkündür. Bu özellikleri sayesinde imalat sektöründe çeşitli parçaların üretiminde güvenilir ve etkili bir malzeme olarak kabul edilir.

1040 imalat çeliği mekanik özellikleri, belirli kriterler üzerinden değerlendirilir (Şekil 5.2). Bu malzemenin çekme mukavemeti yaklaşık olarak 580-700 MPa arasında değişirken akma mukavemeti ise genellikle 320 MPa civarındadır. Bu çelik türü, orta karbonlu çelikler kategorisine dahil edilir ve yüksek mukavemeti ile dikkat çeker. İşlenebilirliği sayesinde çeşitli imalat süreçlerinde kullanılır ve genel olarak makine parçaları, dişliler, mil çubukları, somunlar, cıvata gibi endüstriyel uygulamalarda tercih

edilir. Isıl işlem yöntemleri ile çeşitli sertlik seviyelerine getirilebilir ve bu özellikleriyle geniş kullanım alanlarına hitap edebilir.

Tablo 5.2. 1040 çeliğinin özellikleri

Özellik	Değer
Çekme Mukavemeti	580 - 700 MPa
Akma Mukavemeti	320 - 530 MPa
Uzama (Elongation)	%13 - %20
Sertlik (Brinell Hardness)	160 - 180 HB
Sertlik (Rockwell C - HRC)	13 HRC (Brinell'e dönüştürülmüş)
Shear Mukavemeti (Shear Strength)	350 - 390 MPa
Young Modülü (Elastic Modulus)	190 - 210 GPa
Poisson Oranı (Poisson's Ratio)	0.27 - 0.30
Isıl Genleşme Katsayısı	12 $\mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$
Termal İletkenlik	51 W/m·K
Yoğunluk	7.8 g/cm ³

5.4.2. Tungsten karbür (WC) parmak freze

Tungsten karbür (WC); bileşim olarak tungsten, karbon ve diğer bazı metallerin karışımı olarak elde edilmiş bir metal alaşımıdır ve sahip olduğu üstün dayanıklılık ve yüksek ergime sıcaklığı (2,870°C) ile çok çeşitli endüstrilerde örneğin aşındırıcılar, kesici takımlar, kalıplar ve zımbalar gibi üstün aşınma veya darbe direnci gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılan popüler bir tungsten ve karbon bileşiğidir. Termal iletkenliği ve aşınma direnci çok yüksek bir malzemedir.

Aşınma direnci ve çok sert olması bu malzemenin kesici takım olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Sinterlenmiş bir tungsten karbür çubuğun parmak freze haline getirilmesi, diğer kesici takımlarla işlenmesini imkansız hale getirmektedir. Bu yüzden bu sert metali işleyebilmek için karbürden daha sert olan pırlanta elması olarak da bildiğimiz elmasla, taşlama tezgahlarında işlenmektedir. WC' den üretilen kesici takımlar WC' nin tüm bu fiziksel özelliklerinden dolayı, aşınmaya karşı dirençlidirler. Kesme kenarlarındaki eşsiz keskinlik değeri en iyi kesme performansı vermektedir. Ergime noktasının yüksek olması talaş kaldırma operasyonlarında yüksek sıcaklıklarda çalışabilme olanağı sağlamaktadır.

Yeni talaşlı işleme yöntemleri geliştirildikçe, geleneksel olarak kullanılan HSS takımlar geride kalmıştır. WC parmak frezelerin işlenmesi güç de olsa, 0,05mm çaplarda parmak frezeler üretililmeyi olanaklı hale getirmektedir. WC kesici takımlar, tel erozyonda şekil verilerek de kesici takım yapılabilir. Fakat tel erozyon elektrik akımı ile

kesim yaptığından dolayı WC malzeme yüzeyinden 0,1mm derinlikte kimyasal bozulma meydana gelmektedir.

5.4.3. Elmas taş seti

Tungsten karbür malzemeyi kesici takım haline getirebilmek için tungsten karbür malzemeden talaş kaldırma işlemi yapmak gereklidir.

Bu talaş kaldırma işlemi sertliği çok yüksek olan tungsten karbür malzemeden herhangi bir kesici takımla mümkün olmamaktadır. Tungsten karbür talaşlı sekil verme işleminin en sağlıklı yolu taşlama operasyonudur. Bu işlem elmas taşlarla yapılmaktadır.

Kullanım yerlerine göre elmas taşlar;

- Bağlayıcı kimyası
- İçeriğindeki elmas tanecik boyutu
- Gövde malzemesi

Olarak farklılık göstermektedir.

Bağlayıcı Kimyası:

Reçine, hibrit ve metal bağlayıcılı olarak 3'e ayrılır.

Reçine bağlayıcı, yüksek talaş kaldırma operasyonlarında kullanılır. Taşın kesme yükünü azaltır ve fazla zorlanma yüklerine dayanıklıdır. Nispeten daha yumuşak karbür malzemeler (Cobalt oranı yüksek) için kullanılır. Taşın aşınması ve çapsal ölçü değişimine meyilli olduğu için de dezavantajı bulunur.

Hibrit bağlayıcı, orta seviyede talaş kaldırma operasyonlarında kullanılır. Kesme yük dayanıklılığı orta seviyededir orta sertlikteki karbür malzemelerin işlenmesine uygundur. Orta talaş kaldırma yüklerine dayanıklıdır. Taşın aşınması ve çapsal ölçü koruması reçine bağlayıcıya göre daha rijittir.

Metal bağlayıcı, az talaş kaldırma operasyonlarında kullanılır, kesme yük dayanıklılığı azdır. En sert tungsten karbür malzemeleri rahatlıkla işleyebilir. Taşın aşınması ve çapsal ölçü koruması en dayanıklı taştır.

Gövde Malzemesi:

Elmas taneciklerinin reçine ile birlikte bir kabuk gibi metal disk üzerine tutturulmasıyla taşlama taşı yapılır.

Reçinenin bağlandığı gövde metal ya da kompozit olarak imal edilebilir. Metal gövdeli olanlar, taşlama yüküne ve taşlama sırasında oluşan ısınmaya karşı daha dayanıklıdır fakat ağır bir yapısı olduğundan dolayı CNC taşlama tezgahının spindle'ına fazla yük bindirir.

Kompozit gövde daha hafif, spindle'a olan yükü daha azdır. Fakat fazla taşlama yüküne maruz kaldığında kırılabilir yapıya sahiptir.

Elmas Tanecik Boyutu:

Taşlanacak malzemenin yüzey hassasiyetine göre elmas tanecik boyutu değişkenlik göstermektedir. Tanecik boyutu büyüdükçe taşlanan yüzeyin pürüzlülüğü artar. Burada elmasın tane boyutu yüzeyde bırakacağı çizimin derinliğiyle doğru orantılıdır. Şekil 5.19' da parmak frezenin üretilmesi için kullandığımız bazı taş grupları gösterilmektedir.



Şekil 5.19. Taşlama işleminde kullanılan elmas taş örnekleri (URL-15, 2025)

5.5. Kaplama İşlemleri ve Parmak Frezenin Kaplama Operasyonları

CNC taşlama tezgahında ürettiğimiz parmak frezelerin aşınma ve ısıl dayanımını arttırmak için kaplama işlemine tabii tuttuğumuzdan daha önce bahsedilmişti.

Ürettiğimiz parmak frezelerdeki kaplama operasyonları:

- Yıkama

- Fırçalama
- Tekrar yıkama
- Kaplama
- Tekrar fırçalama

Yıkama operasyonunda frezenin imalatı sırasında kullanılan taşlama yağının uzaklaştırılması amacıyla yapılan işlemdir. Bu işlemde freze içerisinde yağ çözücü bir madde olan sıvıya saldırılarak ultrasonik titreşimlerle kirlerinden arındırılır.

Fırçalama operasyonunda, taşlama yöntemiyle üretilen tüm kesici takımlarda da olduğu gibi kesme ağızlarında mikro girinti ve çıkıntılar olur. Bu keskin girinti ve çıkıntılar kesme ağızı boyunca zayıf kırılmalı tepecikler meydana getirir. Fırçalama işleminde kesici ağızlar aşındırıcı bir fırça ile belli bir sürede fırçalanır. Bu sayede kesici ağızlarda bahsettiğimiz mikro testere ağızı yapısının fırçalanmasıyla daha az çıkıntıların kalmasına ve daha oval ve temiz kesici ağızların elde edilmesine olanak sağlar. Ayrıca hiçbir kesici takımında tamamen keskin ağızlar istenmez. Nedeni ise hemen kırılmaya uğrayıp köreleceğinden dolayıdır. Fırçalamanın bir diğer sebebi ise, keskin kenarlarda kaplamanın tutunabileceği kadar bir alan olmaması ve sağlıklı bir kaplama yapılamayacağıdır.

Fırçalamanın ardından oluşan toz zerreciklerinin kesici takımdan uzaklaştırılması için tekrardan bir yıkama işlemine tabii tutulur. Bu aşamada çözücülü bir sıvı kullanılır ve ardında durulama sıvısına daldırılarak durulama operasyonu yapılır. Kesici takım tamamen temizlendikten sonra kaplama işlemine geçilir.

Kaplama işleminde kesici takımlar bir tepsi üzerindeki metal borular içine yerleştirilir. Bu boruların amacı kesici takımın her tarafının kaplanmaması için yapılır. Boru içerisindeki kısım kaplanmayacağı için uygun boru uzunluğu ayarlanır. Kaplamanın cinsine göre kaplama malzemesi plazma haline getirilecek hazneye yerleştirilir. Kaplama cihazının kapağı kapatılarak kaplama cihazının içi vakuma alınır. Cihaz içerisinde hava kalmayacak şekilde vakumlanır. Ardından kaplama malzemesinin üzerine yüksek enerjili şarj yüklenir ve kaplama malzemesi plazma haline getirilir. Bu plazma kaplama cihazının içerisindeki tüm yüzeylere yapışmaya başlar. Kaplamanın homojen olabilmesi için kesici takımlar kendi eksenleri etrafında otomatik olarak döndürülür. Kaplama ortamının sıcaklığı kaplamanın daha sağlıklı yapışabilmesi için 500-600C° sıcaklığa kadar ısıtılır. Gerekli süre sonunda yavaş bir soğutmayla kaplanmış ürünler kaplama cihazında çıkarılır.

Kaplama sonunda kesici takım üzerinde soğuk yapışmalar da meydana gelebileceği için bu yüzeyler son kez fırçalanarak kaplama yapılmış ürün üzerindeki toz zerrecikleri yüzeyden koparılır. Böylece daha pürüzsüz bir kaplama yüzeyi elde edilir.



6. BULGULAR

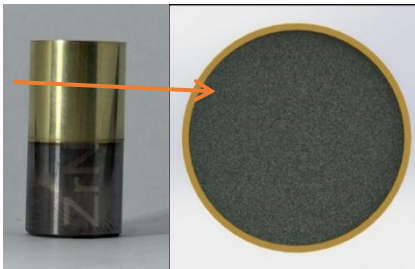
6.1.Çalışmada Kullanılan Kaplamaların Mikro Yapı Analizleri

Çalışmada, Tungsten karbürden (WC) ürettiğimiz farklı helisel açılara sahip parmak frezelerin yüzeyini biraz daha mekanik ve kimyasal gereksinimlerini karşılayacak hale getirmek için yüzeyine uyguladığımız ZrN, AlCrN, TiSiN ve AlTiN kaplamalarının etkilerini daha iyi görebilmek için numunelerin mikro yapıları incelenmiştir.

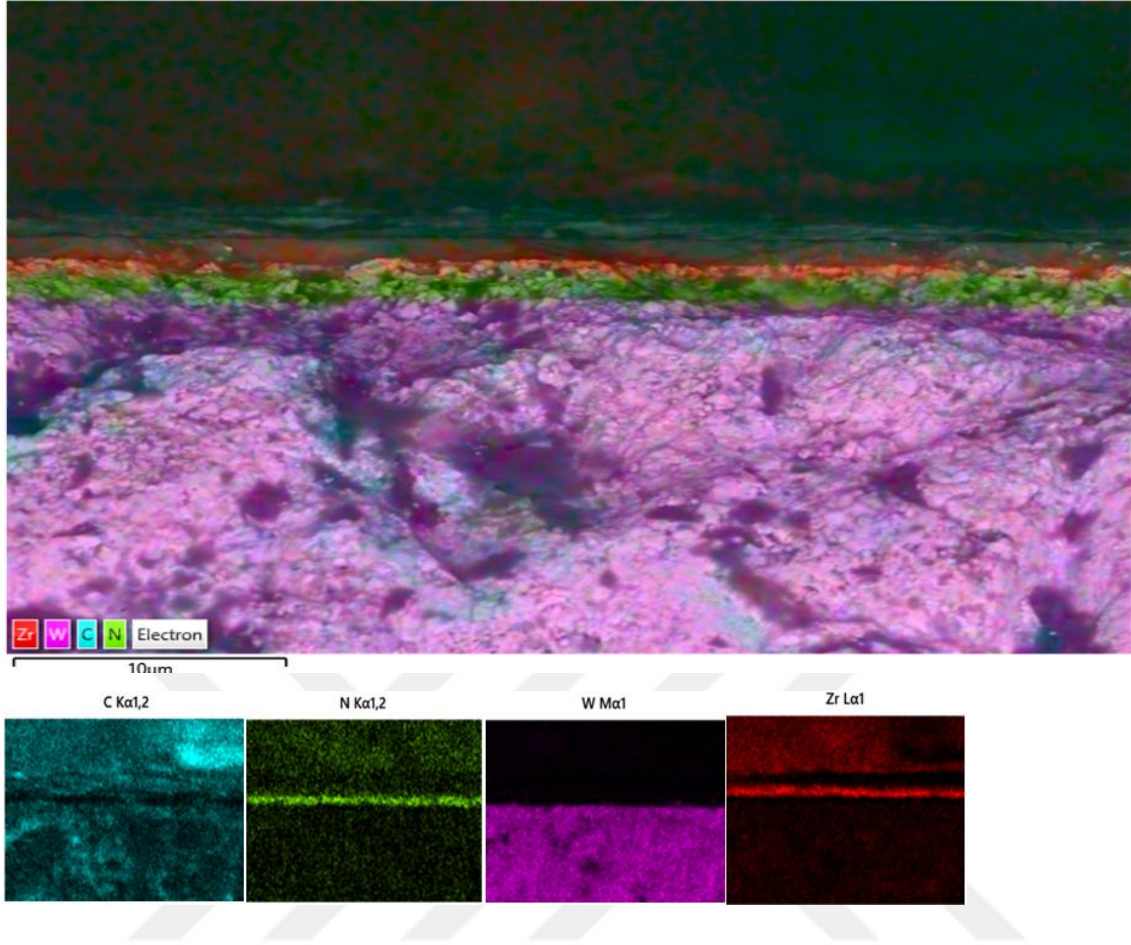
PVD (Fiziksel buhar biriktirme) yöntemiyle, kendisi çok sert ve üstün mekanik özelliklere sahip Tungsten karbürden (WC) üretilen parmak frezelerin yüzeyi nano boyut da ZrN, AlCrN, TiSiN, AlTiN kaplanmıştır. Numuneler metalografik olarak, Taramalı elektron mikroskobundan (SEM) farklı büyütmelerde iç yapı görüntüleri, element dağılımını görebilmek için bölgesel ve çizgisel EDS analizi ve numunenin bütününde elementlerin dağılımını göre bilmek için Mapping analizleri yapılmıştır.

6.1.1. ZrN kaplama için analizler

ZrN kaplanmış numunenin, enine kesit SEM görüntüsü üzerinden alınan Mapping analizini Şekil 6.2’ de incelediğimizde; ZrN kaplamanın, Tungsten karbür (WC) altlığı iyi bağlandığı, delaminasyon veya çatlak oluşumu olmadan yoğun ve homojen bir mikroyapı sergilediği görülmektedir. Kaplama kalınlığının yaklaşık 2 µm olduğu görülmüştür. Kaplamanın yüzeyinde kırmızı renkle belirtilen Zr’ un ayrı bir kaplama gibi görünmesinin nedeni; kaplama yöntemi olan PVD’ nin fiziksel buhar biriktirme yöntemi olması ve ergitilerek buharlaştırılan ZrN’ ün her ne kadar mekanik alaşımlandırma yapılsa da Zr ve N ün farklı buharlaşma derecelerinden kaynaklı buharlaşarak yüzeye kaplanmaları bir sırayla gerçekleşmiştir. Şekil 6.1’ de kesitini aldığımız numune gösterilmektedir.

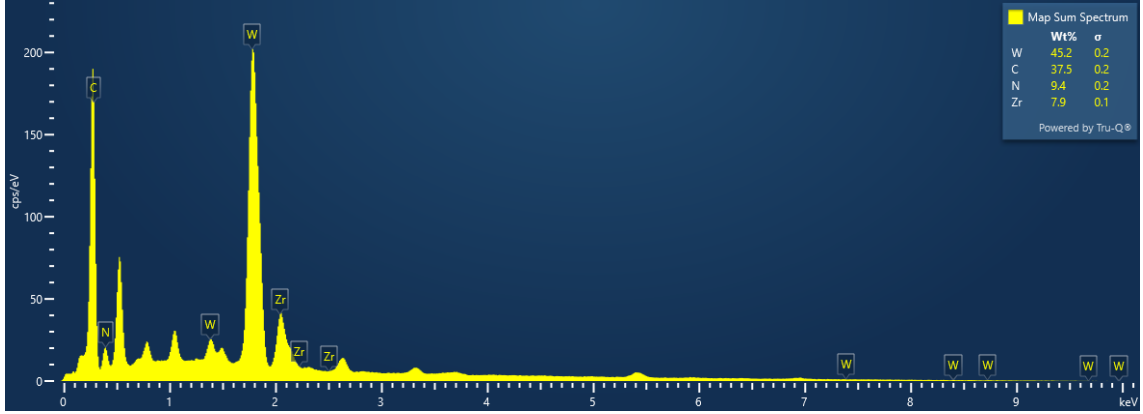


Şekil 6.1. ZrN analizi için kaplanmış WC numune ve alınan kesit görüntüsü

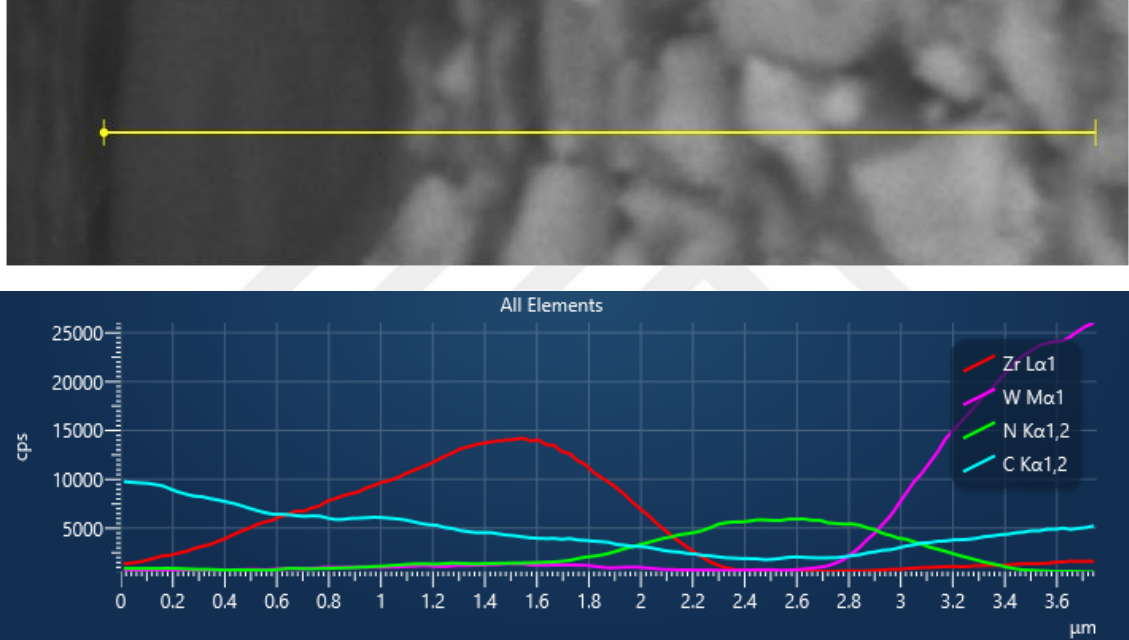


Şekil 6.2. ZrN kaplanmış numune yüzeyinden alınan Mapping analizi

ZrN kaplanmış numunenin kaplama ve altlık (WC) bölgelerinin her ikisini birden içerecek şekilde aldığımız Şekil 6.3’ de bölgesel EDS analizinde; yüzdesel olarak W:45.2 C:37.5, N:9.4, Zr:7.9 oranlarında bulunmuştur. Şekil 6.4’ de numunenin kaplama bölgesinden başlayarak kaplanan altlık tabakasının bir bölümünü içerecek şekilde aldığımız çizgisel EDS analizi sonucunda 0-2.3 µm aralığında Zr ve C un yoğun olduğu görülürken N un 1.8 µm dan başlayarak 3.4 µm luk kısımda daha fazla yer alırken W in 2.8 µm dan başlayarak artış gösterdiği görülmektedir. Çizgisel EDS analizi bize kaplama bölgesi ve kaplanan tabla bölgelerinin nereden başlayarak nereye kadar ilerlediği konusunda bize net bilgiler vermiştir.



Şekil 6.3. ZrN kaplanmış numune yüzeyinden alınan bölgesel EDS analizi



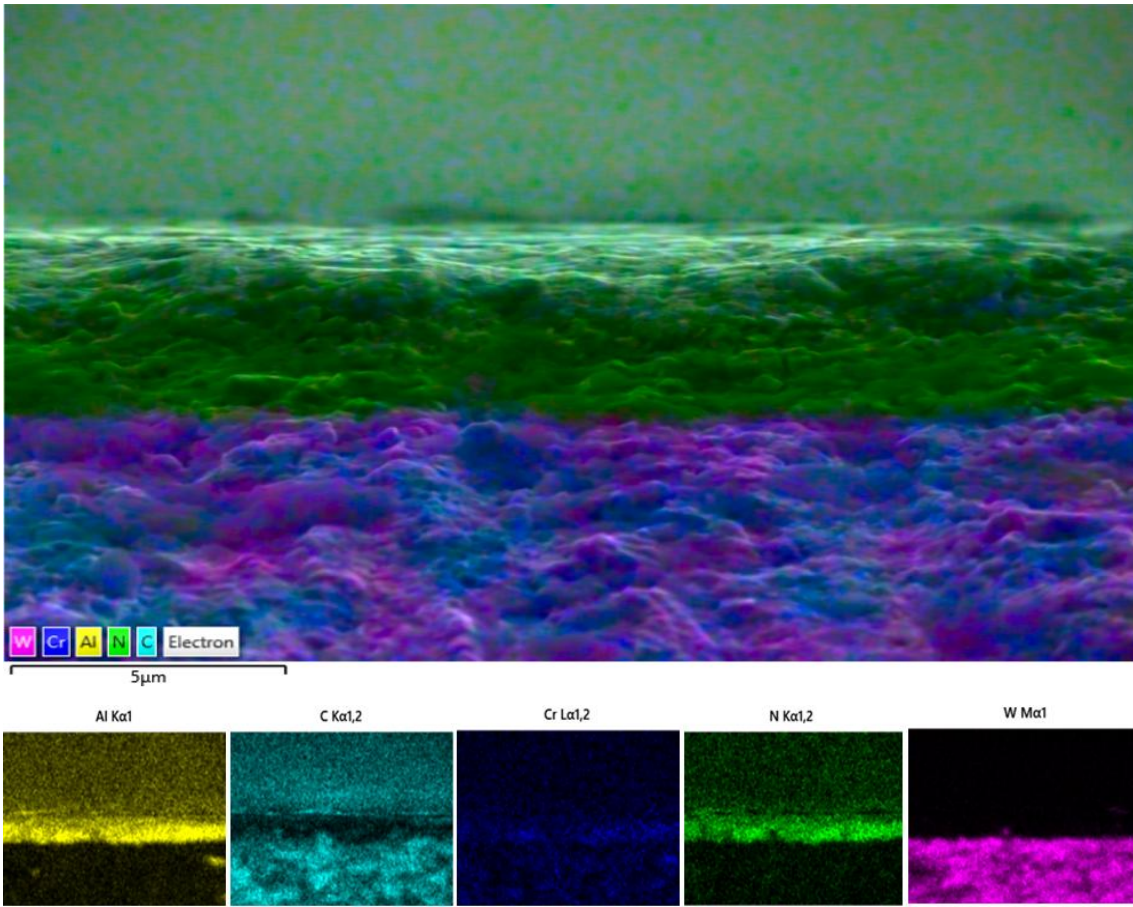
Şekil 6.4. ZrN kaplanmış numune yüzeyinden alınan çizgisel EDS analizi

6.1.2. AlCrN kaplama için analizler

AlCrN kapladığımız numunenin, enine kesit SEM görüntüsü üzerinden alınan Mapping analizini de Şekil 6.6' da incelediğimizde; AlCrN kaplamanın, Tungsten karbür (WC) altlığa bağlanmasında herhangi bir sıkıntı görülmemiş olup, delaminasyon veya çatlak oluşumuna da rastlanılmayarak ve homojen bir mikroyapı sergilediği görülmektedir. Kaplama kalınlığının yaklaşık 4,5 µm olduğu görülmüştür. Kaplamanın yüzeyindeki renk karışımı Al, Cr ve N' un homojen şekilde karıştığını göstermektedir.



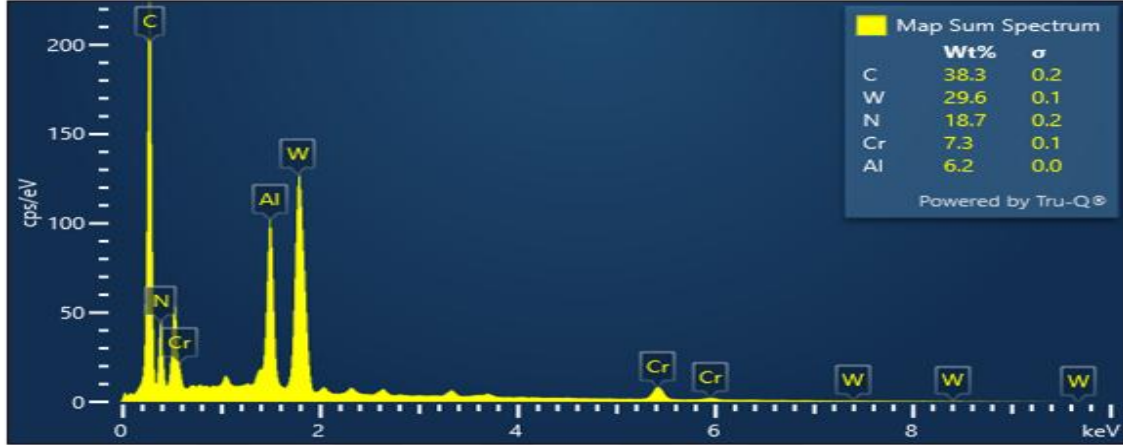
Şekil 6.5. AlCrN analizi için kaplanmış WC numune ve alınan kesit görüntüsü



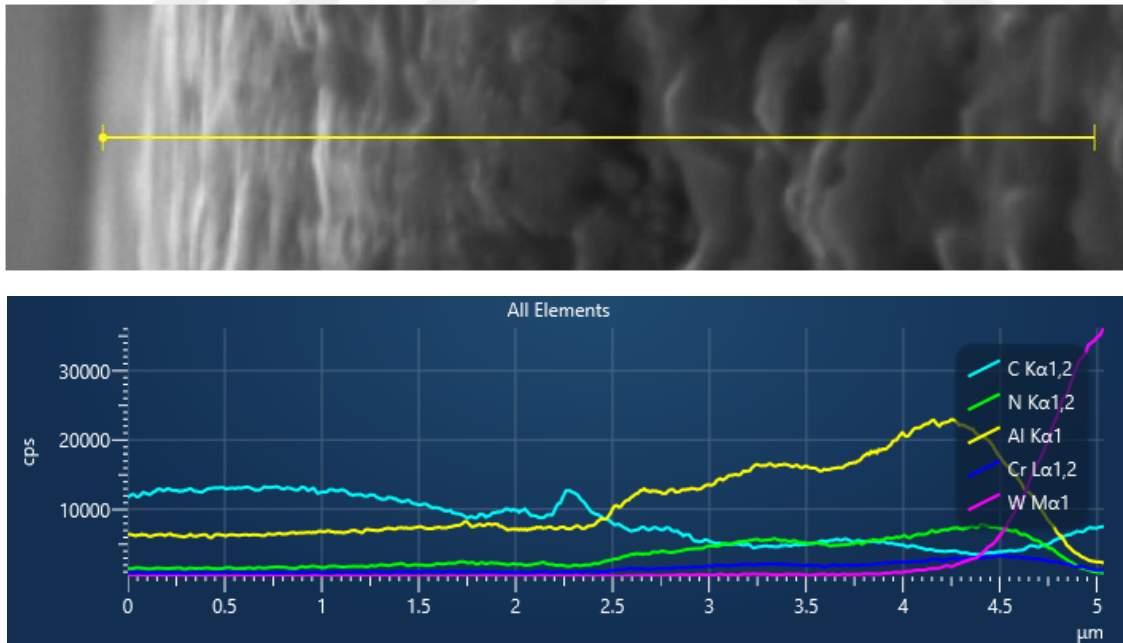
Şekil 6.6. AlCrN kaplanmış numune yüzeyinden alınan Mapping analizi

AlCrN kaplanmış numunenin kaplama ve altlık (WC) bölgelerinin her ikisini birden içerecek şekilde aldığımız Şekil 6.7’ de bölgesel EDS analizinde; yüzdesel olarak W:29.6 C:38.3, N:18.7, Cr:7.3, Al:6.2 oranlarında bulunmuştur. Şekil 6.8’ de numunenin kaplama bölgesinden, kaplanan altlık tabakasının bir bölümünü içerecek şekilde aldığımız çizgisel EDS analizi sonucunda 0-2.5 µm aralığında C’ un yoğun olduğu görülürken N un ve Al’ un

2.5 μm dan başlayarak 4 μm luk kısımda daha fazla yer aldığı görülmüştür. 2.5-4 μm aralığında Cr' yoğunluğunun fazla olduğu ve W in 4.5 μm dan başlayarak artış gösterdiği görülmektedir. Çizgisel EDS analizi bize kaplama bölgesi ve kaplanan tabla bölgelerinin nereden başlayarak nereye kadar ilerlediği konusunda bize net bilgiler vermiştir.



Şekil 6.7. AlCrN kaplanmış numune yüzeyinden alınan bölgesel EDS analizi



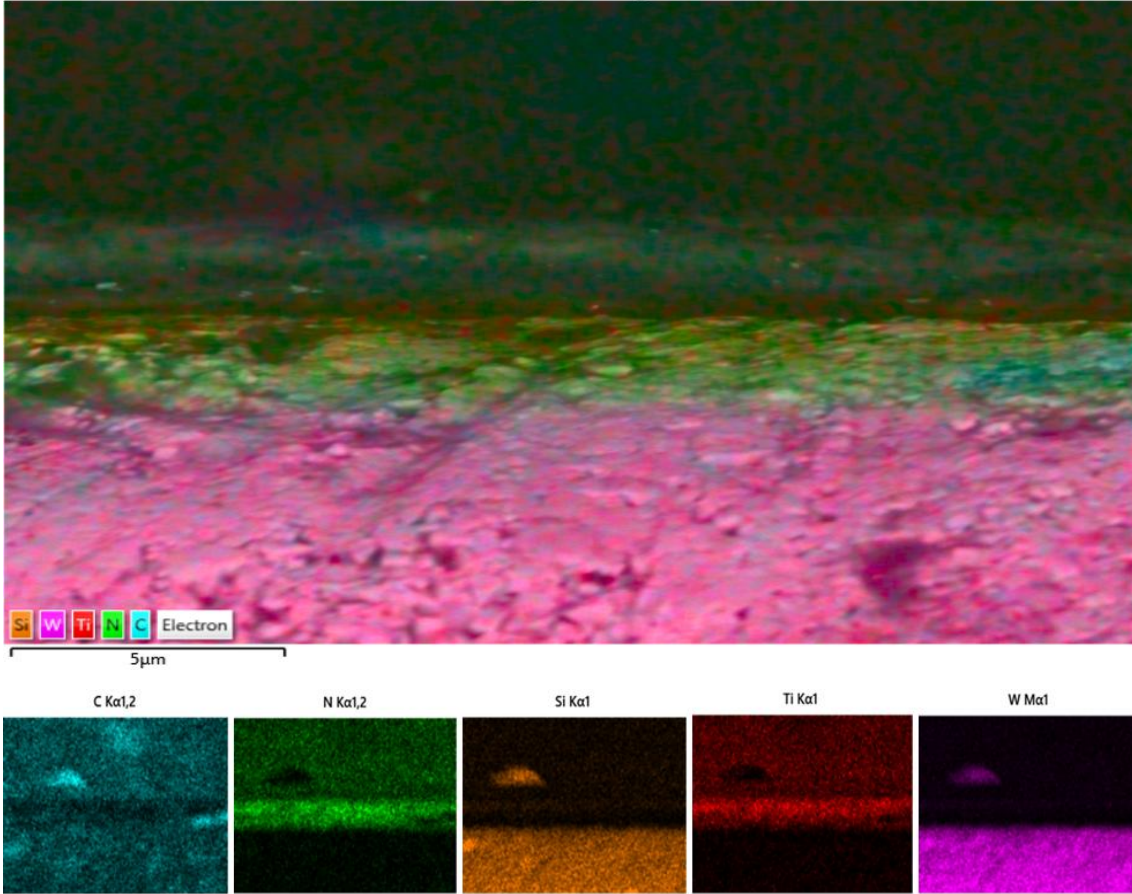
Şekil 6.8. AlCrN kaplanmış numune yüzeyinden alınan çizgisel EDS analizi

6.1.3. TiSiN kaplama için analizler

Bir diğr TiSiN kapladığımız numunenin, enine kesit SEM görüntüsü üzerinden alınan Mapping analizini Şekil 6.10’ da incelediğimizde; Kaplama kalınlığının yaklaşık 3 µm olduğu görülmüştür.

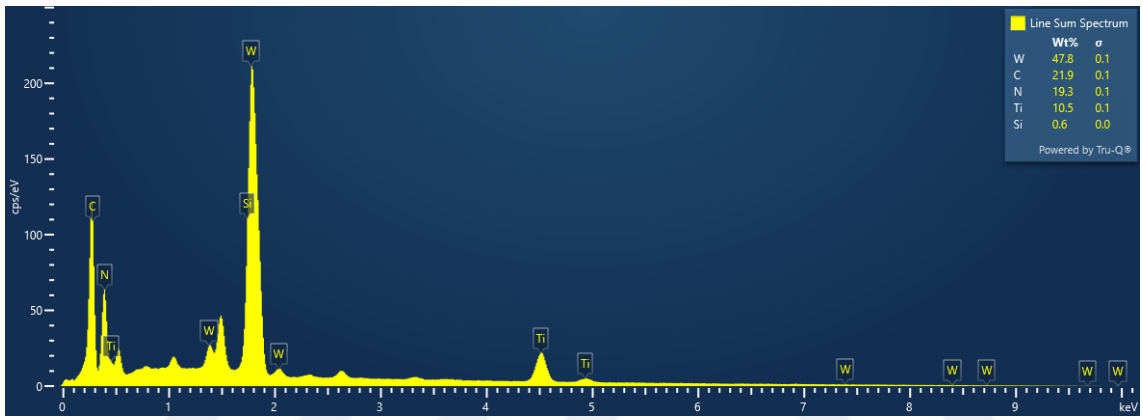


Şekil 6.9. TiSiN analizi için kaplanmış WC numune ve alınan kesit görüntüsü

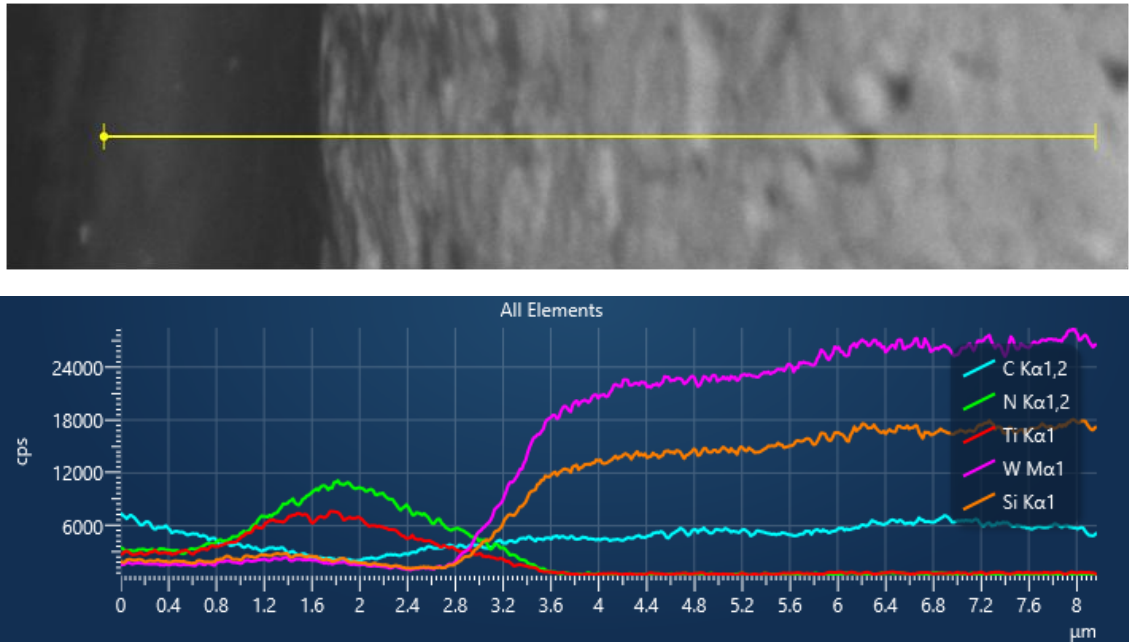


Şekil 6.10. TiSiN kaplanmış numune yüzeyinden alınan Mapping analizi

TiSiN kaplanmış olduğumuz numunenin kaplama ve altlık (WC) bölgelerinin her ikisini birden içerecek şekilde aldığımız Şekil 6.11’ de bölgesel EDS analizinde; yüzdesel olarak W:48.7 C:21.9 N:13.9 Ti:10.5 Si:0.6 oranlarında bulunmuştur. Şekil 6.12’ de numunenin kaplama bölgesinden başlayarak kaplanan altlık tabakasının bir bölümünü içerecek şekilde aldığımız çizgisel EDS analizi sonucunda 0-2.8 μm aralığında N ve Ti’ un yoğun olduğu görülürken W, Si, C’ un 3 μm dan başlayarak 6 μm luk kısımda artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.11. TiSiN kaplanmış numune yüzeyinden alınan bölgesel EDS analizi



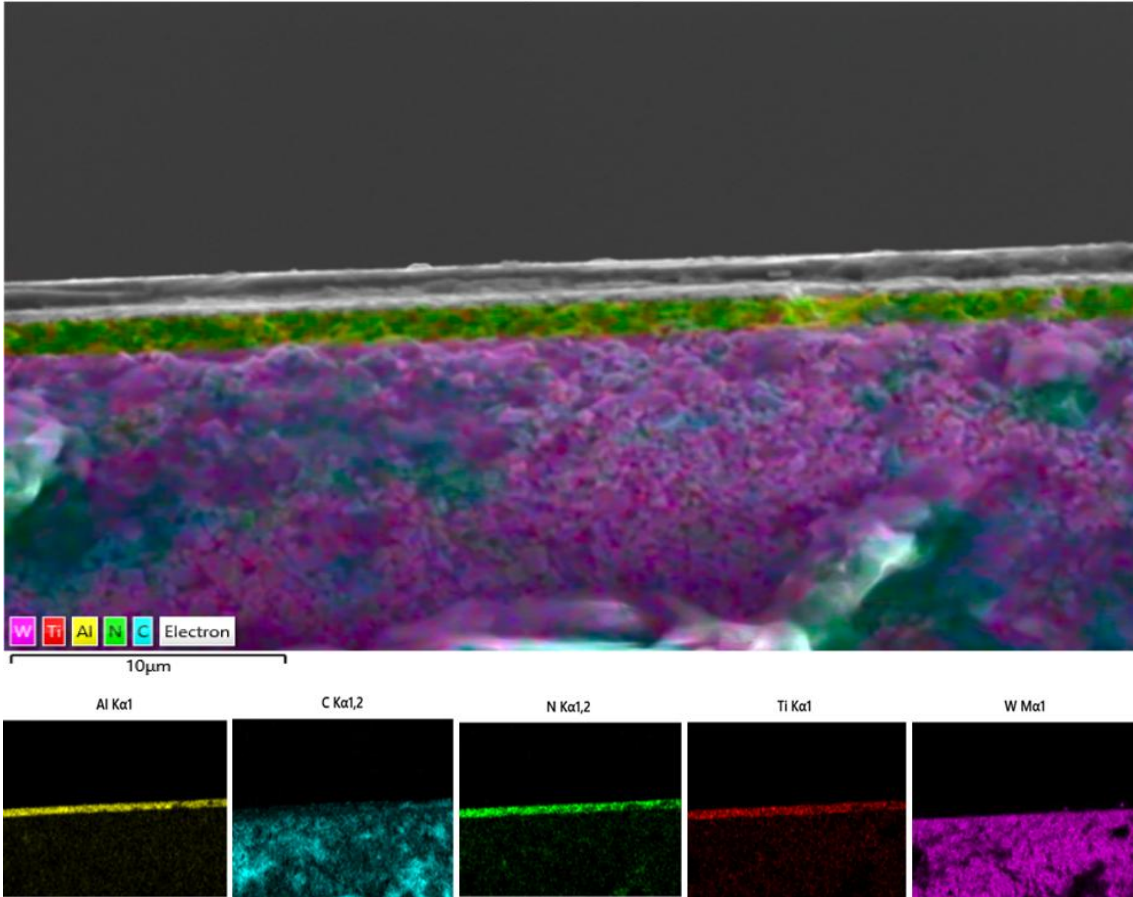
Şekil 6.12. TiSiN kaplanmış numune yüzeyinden alınan çizgisel EDS analizi

6.1.4. AlTiN kaplama için analizler

Enine kesit alınan AlTiN kaplamanın, SEM görüntüsü üzerinden alınan Mapping analizini Şekil 6.14’de incelediğimizde; AlTiN kaplamanın, Tungsten karbür (WC) altlığına iyi bağlandığı ve homojen bir mikroyapı sergilediği görülmektedir. Kaplama kalınlığının yaklaşık 2.7 μm olduğu görülmüştür. Kaplamanın çizgisel eds analizinde de görüldüğü gibi kaplama katmanları grafiksel olarak orantılı bir grafik oluşturmaktadır.

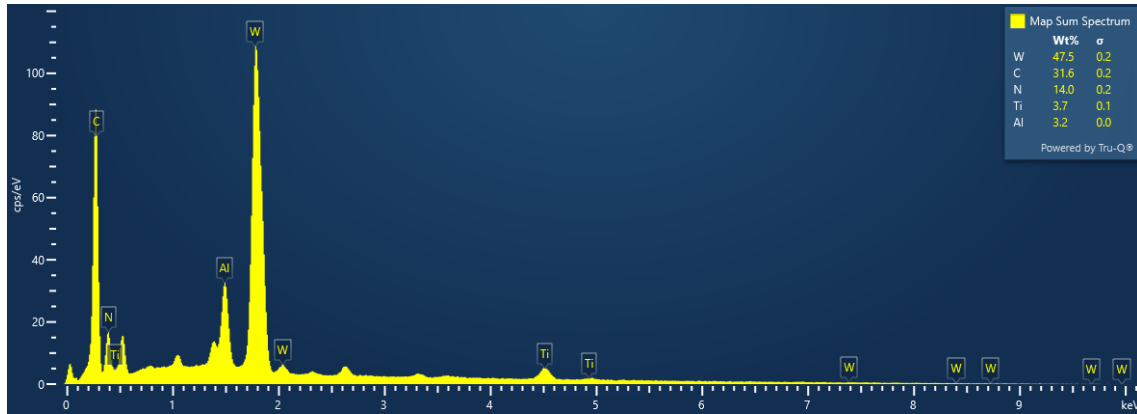


Şekil 6.13. AlTin analizi için kaplanmış WC numune ve alınan kesit görüntüsü

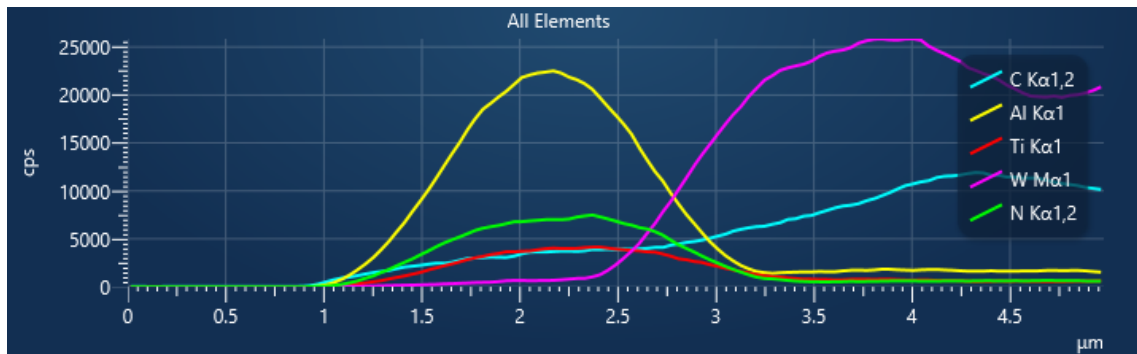
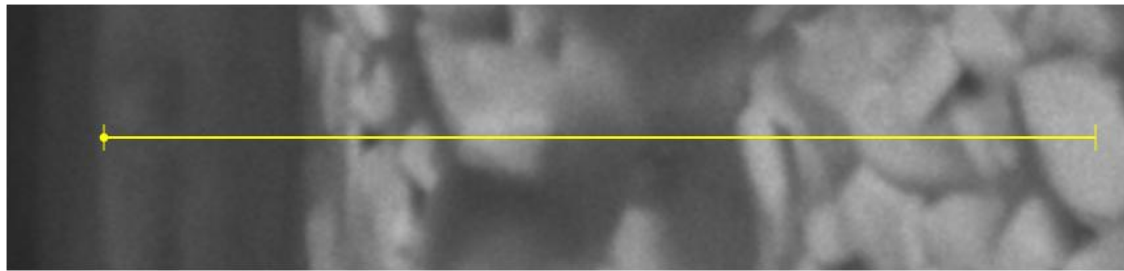


Şekil 6.14. AlTiN kaplanmış numune yüzeyinden alınan Mapping analizi

AlTiN kaplanmış numunenin kaplama ve altlık (WC) bölgelerinin her ikisini birden içerecek şekilde aldığımız Şekil 6.15’ de bölgesel EDS analizinde; yüzdesel olarak W:47.5, C:31.6 N:14, Ti:3.7, Al:3.2 oranlarında bulunmuştur. Şekil 6.16’ da numunenin kaplama bölgesinden başlayarak kaplanan altlık tabakasının bir bölümünü içerecek şekilde aldığımız çizgisel EDS analizi sonucunda 1-3 μm aralığında Ti, Al, N ve C’ un yoğun olduğu görülürken C un 1 μm dan başlayarak 3 μm luk kısımda daha fazla yer alırken W in 2.5 μm dan başlayarak artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.15. AlTiN kaplanmış numune yüzeyinden alınan bölgesel EDS analiz



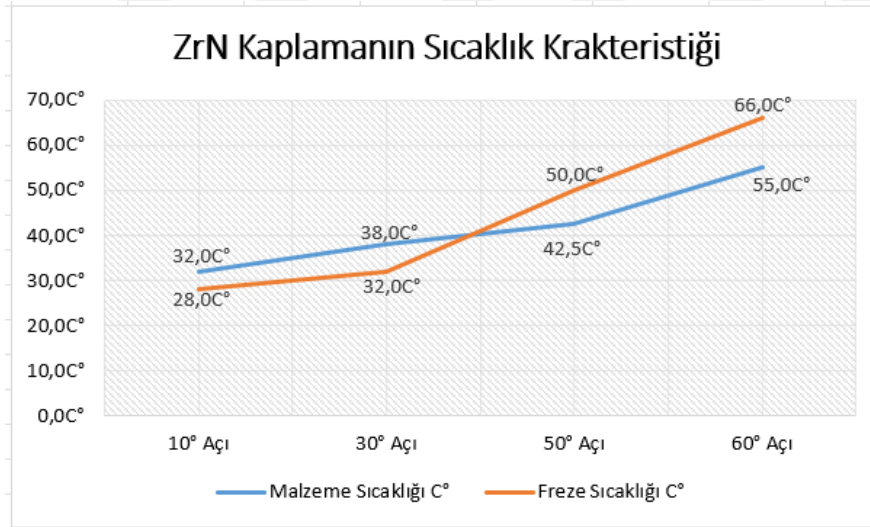
Şekil 6.16. AlTiN kaplanmış numune yüzeyinden alınan çizgisel EDS analizi

6.2. Parmak Frezelerin Kaplama Türlerine ve Helis Açılarına Göre Karakteristik İncelenmesi

6.2.1. ZrN kaplanmış parmak frezenin karakteristiği

NC freze tezgahına bağlamış olduğumuz 1040 çeliğine ZrN kaplama ile talaş kaldırma işlemi sonucunda hem çelik numunede hem de ZrN kaplanmış parmak frezede ısınma meydana gelmiştir. Toplamda verilen 5mm'lik pasoda şekilde görülen sıcaklık değerleri her bir helis açısı için hem parmak frezeden hem de numune çelikten ölçülmüştür.

Şekil 6.17' de de görüldüğü gibi helis açısı artan ZrN kaplı parmak frezenin hem çelik hem de takımın sıcaklık değerlerinin paralel olarak arttırdığı görülmüştür.



Şekil 6.17. ZrN kaplanmış 10°,30°,50°,60° helisli frezelerin çelik ve takım üzerindeki sıcaklık değerleri

Yüzey işleme sonrası 1040 çeliğinin yüzey pürüzlülüğü ölçüldüğünde Şekil 6.18' deki gibi değerler elde edilmiştir.

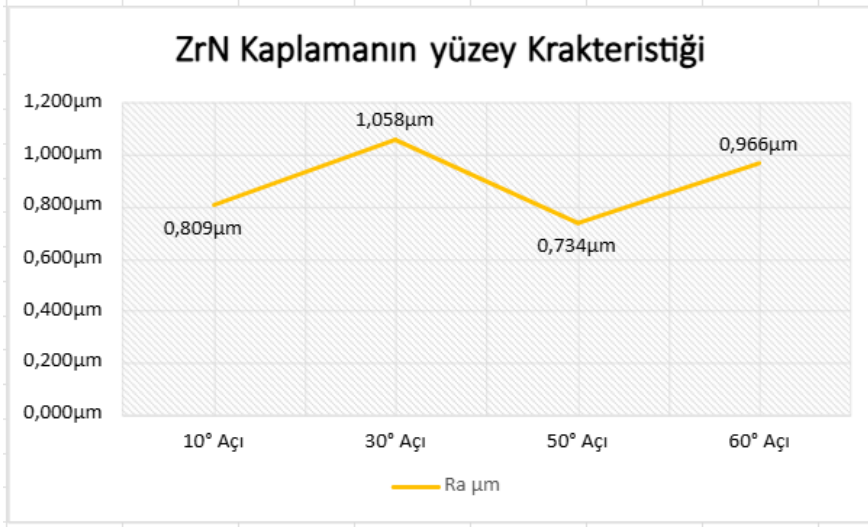


Şekil 6.18. Yüzey ölçüm cihazının ekran görüntüsü



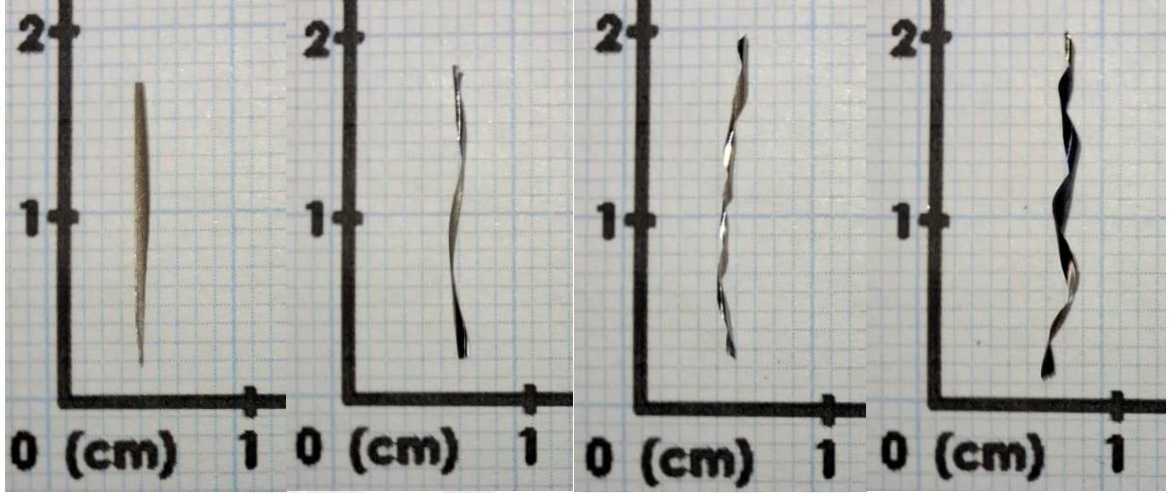
Şekil 6.19. ZrN kaplanmış parmak freze ile işlenmiş malzemelerin yüzey görselleri

Şekil 6.20' de ZrN kaplanmış parmak frezelerin yüzey pürüzlülüğü görülmektedir. Bu kaplamaya göre en kaba yüzeyin 30° helis açısında meydana geldiği ve en hassas yüzeyin de 50° helis açısında meydana geldiği görülmektedir.

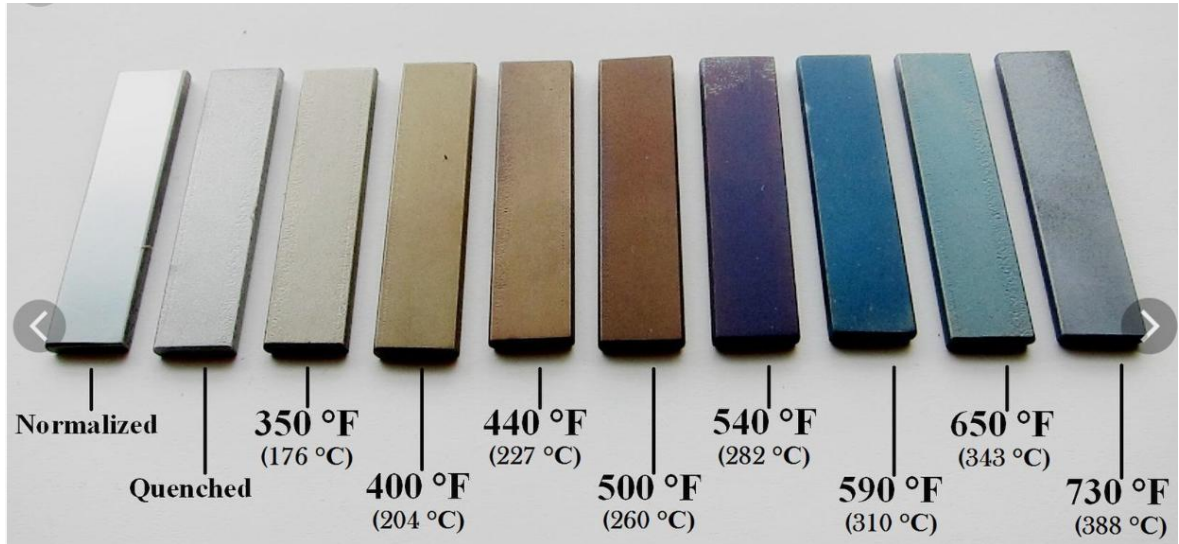


Şekil 6.20. 1040 çeliğinin helislere göre Ra (Roughness Average) cinsinden yüzey pürüzlülüğü grafiği

Şekil 6.21’ de ZrN kaplanmış ve 10°, 30°, 50°, 60° helis açısıyla işlenmiş çelikten çıkan talaşın, ısı etkiye maruz kaldığı ve talaş renginin kahverengi olduğu görülmüştür, talaşın geometrik yapısının da ortalama 3° ile 45° arasında değişen bir helisli yapıya sahip olduğu görülmüştür.

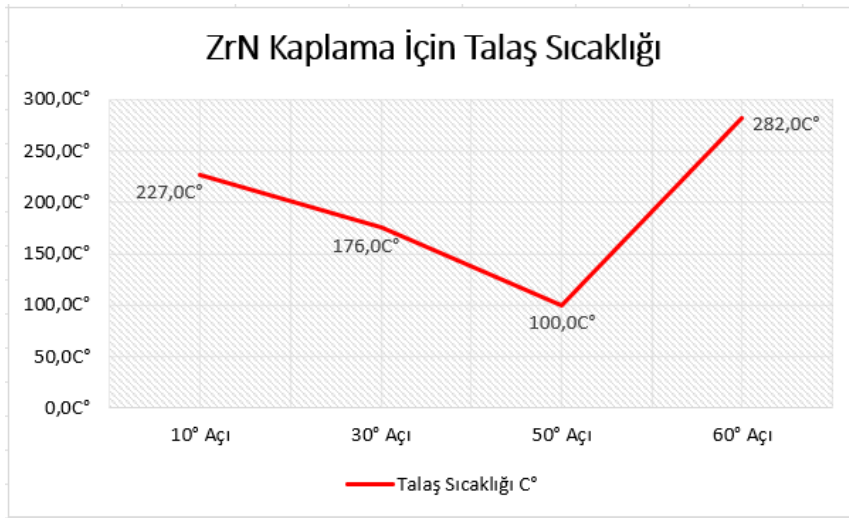


Şekil 6.21. ZrN kaplanmış, sırasıyla 10°, 30°, 50°, 60° helis açılı parmak frezenin talaş yapısı ve rengi ve boyutu



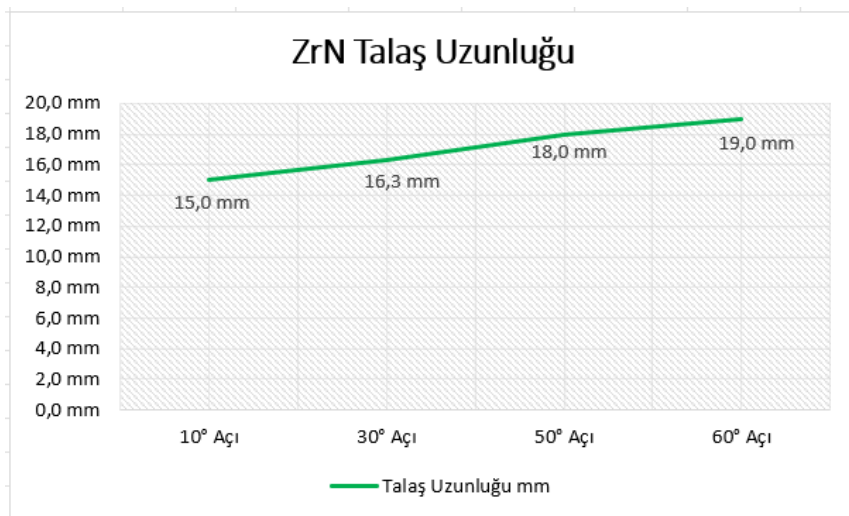
Şekil 6.22. Çeliğin ısı etkisiyle aldığı renklerin kartelası (URL-17, 2025)

Şekil 6.23’ de de görüldüğü üzere 10° helisli ZrN parmak frezenin talaşı yaklaşık olarak 227C° civarındadır. 30° helisli ZrN parmak frezenin talaşı yaklaşık 176C° civarındadır. 50° ZrN normal çelik rengini koruduğundan sıcaklık değeri 100C° altında olduğu görülmektedir. 60° ZrN talaşında mor renk görüldüğünden yaklaşık sıcaklığının 282C° civarı olduğu görülmüştür. Ayrıca talaş boylarının helis açısı arttıkça arttığı da görülmüştür. Talaş uzunlukları sırasıyla 10° helis için 15mm, 30° helis için 16,3mm, 50° helis için 18mm, 60° helis için 19mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.23. ZrN talaş sıcaklıkları

İşlem sonrasında, çıkan talaşın geometrisi ve uzunluklarının ölçülmesiyle Şekil 6.24’ deki sonuçlar ortaya çıkmıştır. Eşit helislerdeki talaş uzunluklarının birbirinden farklı olduğu görülmüştür.

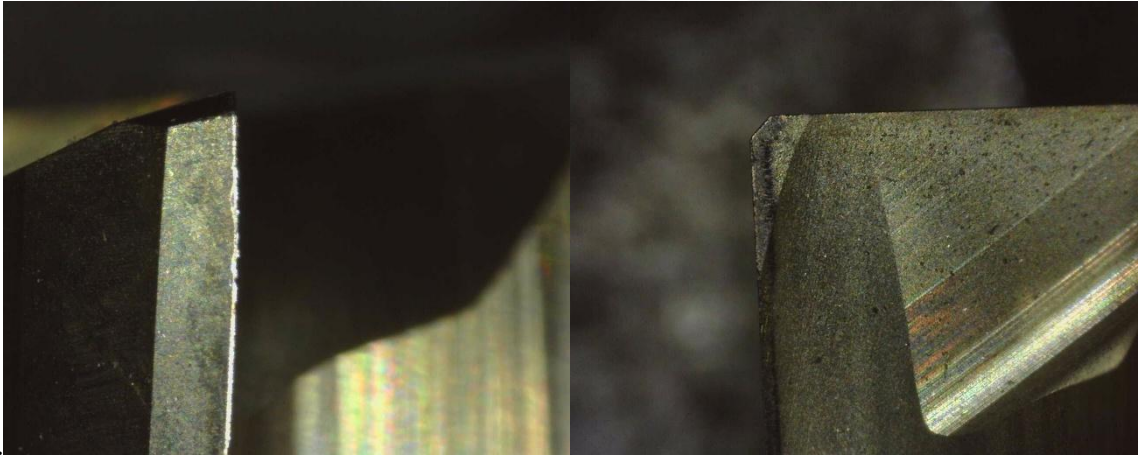


Şekil 6.24 ZrN kaplama talaş uzunlukları

6.2.1.1 ZrN kaplama için aşınma karakteristiği

Kesici takımların çelik üzerinden talaş kaldırma sırasında kesme kenarlarında çeşitli kaplama kalkmaları, aşınma izleri, mikro ve makro kırıklar meydana gelmektedir. Bu da kesici takımların ömrünü belirlemektedir. Bu çalışmada incelediğimiz bir diğer konu da kaplamalara ve helis açılara göre parmak frezelerde meydana gelen aşınma değerleridir.

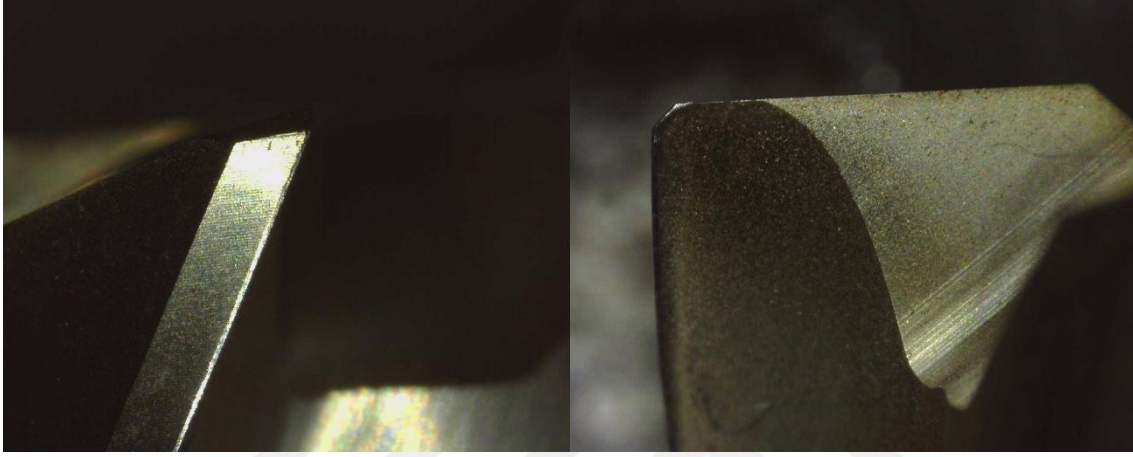
Şekil 6.25’ de solda görünen resimde, düzenli yan yüzey aşınması görülmektedir. Yan kesme kenarındaki parlamaya dikkat edilecek olursa parlaklığın alın kısmına doğru mini kırıkların tespit edildiği görülmüştür. Burada aşınma minimal düzeyde ve sürekli durumdadır. Kırıklar genellikle kaplama kalkması şeklinde meydana gelmiştir. Onun dışında herhangi bir kopma erozyon durumu tespit edilmemiştir. Resimde sağdaki görselde kesme kanalı içerisindeki detay görülmektedir. Bu detayda kaplama üzerinde renk farkı oluştuğu görülmüştür. Bu renk değişimi kesme sırasında talaş kaldırırken oluşan ısı ve sürtünmeden kaynaklı olduğu anlaşılmıştır. Bu renk değişiminin kesme performansına herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür.



Şekil 6.25. ZrN kaplanmış 10° parmak freze için aşınma görselleri

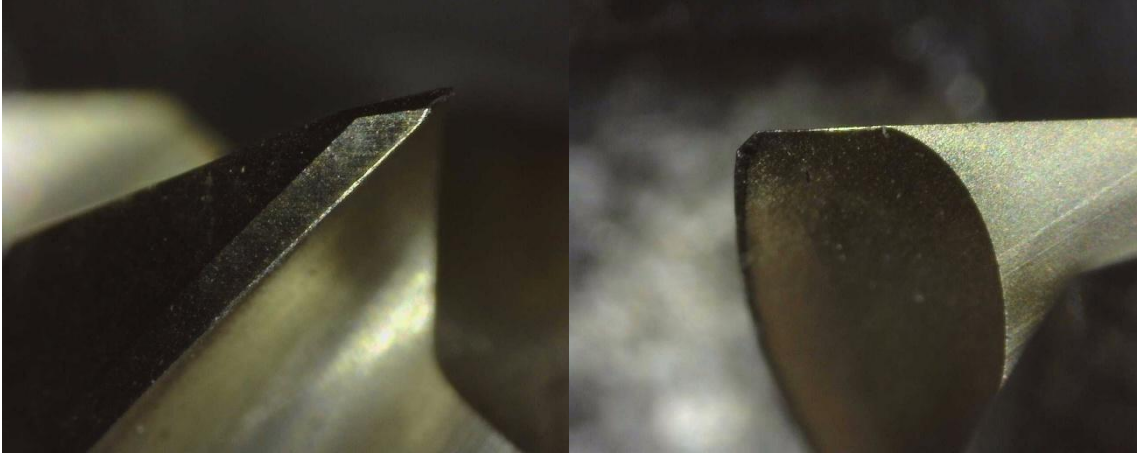
Şekil 6.26’ da solda görünen resimde, düzenli yan yüzey aşınması görülmektedir. Yan kesme kenarındaki parlama bu aşınmanın göstergesidir. Burada aşınma minimal düzeydedir ve sürekli durumdadır. Yanal kesme kenarında kırıklar meydana gelmemiştir. Onun dışında herhangi bir kopma erozyon durumu tespit edilmemiştir. Resimde sağdaki görselde kesme kanalı içerisindeki detay görülmektedir. Bu detayda kaplama üzerinde renk

farkı olduğu görülmüştür. Bu renk değişimi kesme sırasında talaş kaldırırken oluşan ısı ve sürtünmeden kaynaklı olduğu anlaşılmıştır. Bu renk değişiminin kesme performansına herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Yine sağdaki resimde alın kesme kenarında minimal kırıklar tespit edilmiştir. Tam olarak yanak kesme kenarı ve alın kesme kenarının birleşme noktasında meydana gelmiştir. Kırık, kaplamanın tam olarak görevini yerine getirmediğinin göstergesi olmuştur.



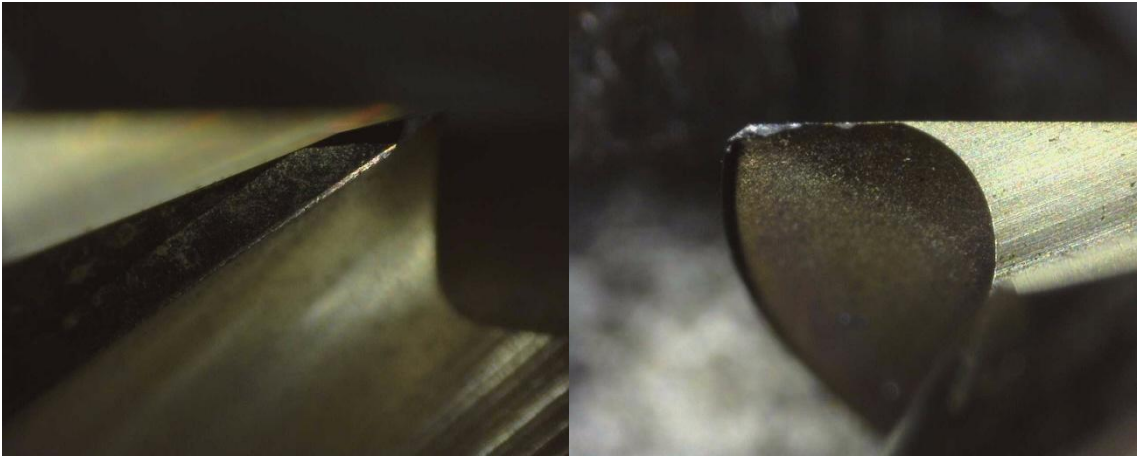
Şekil 6.26. ZrN kaplanmış 30° parmak freze için aşınma görselleri

Şekil 6.27’ de solda görünen resimde, düzenli yan yüzey aşınması görülmektedir. Fakat bu aşınma neredeyse yok gibi olduğundan ihmal edilebilir düzeydedir. Resimde sağdaki görselde kesme kanalı içerisindeki detay görülmektedir. Bu detayda kaplama üzerinde renk farkı olduğu görülmüştür. Bu renk değişimi kesme sırasında talaş kaldırırken oluşan ısı ve sürtünmeden kaynaklı olduğu anlaşılmıştır. Bu renk değişiminin kesme performansına herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Yine sağdaki resimde alın kesme kenarında herhangi bir aşınma ya da kırık tespit edilememiştir. Bu numune için kaplama ve helis açısı performansı gayet iyi durumda olduğu yorumu yapılabilir.



Şekil 6.27. ZrN kaplanmış 50° parmak freze için aşınma görselleri

Şekil 6.28’ de solda görünen resimde, düzenli yan yüzey aşınması görülmektedir. Fakat bu aşınma neredeyse yok gibi olduğundan ihmal edilebilir düzeydedir. Resimde sağdaki görselde kesme kanalı içerisindeki detay görülmektedir. Bu detayda kaplama üzerinde renk farkı oluştuğu görülmüştür. Bu renk değişimi kesme sırasında talaş kaldırırken oluşan ısı ve sürtünmeden kaynaklı olduğu anlaşılmıştır. Bu renk değişiminin kesme performansına herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Yine sağdaki resimde alın kesme kenarında derin aşınma ve kırıklar tespit edilmiştir. Bu derin kırıklar kesme performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Sağdaki görselde kem kaplama kalkmış hem de parmak frezeden kopmalar meydana gelmiştir. Bu numune için kaplama ve helis açısı performansı vasat düzeydedir yorumu yapılabilir.

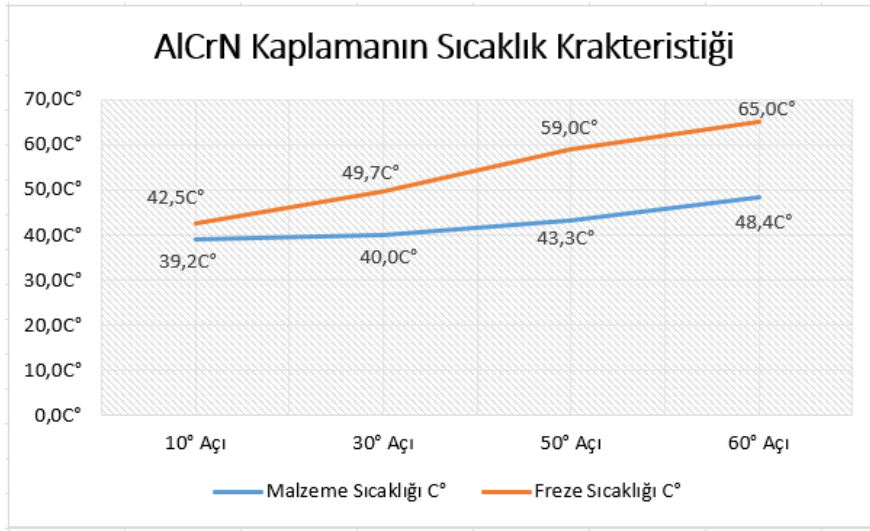


Şekil 6.28. ZrN kaplanmış 60° parmak freze için aşınma görselleri

6.2.2. AlCrN kaplanmış parmak frezenin karakteristiği

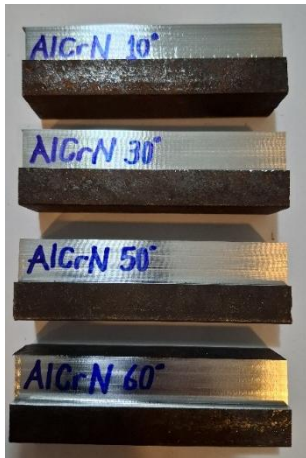
NC freze tezgahına bağlamış olduğumuz 1040 çeliğine AlCrN kaplama ile talaş kaldırma işlemi sonucunda hem çelik numunede hem de AlCrN kaplanmış parmak frezede ısınma meydana gelmiştir. Toplamda verilen 5mm'lik pasoda şekilde görülen sıcaklık değerleri her bir helis açısı için hem parmak frezeden hem de numune çelikten ölçülmüştür.

Şekil 6.29' de de görüldüğü gibi helis açısı artan ZrN kaplı parmak frezenin hem çelik hem de takımın sıcaklık değerlerinin paralel olarak arttırdığı görülmüştür.



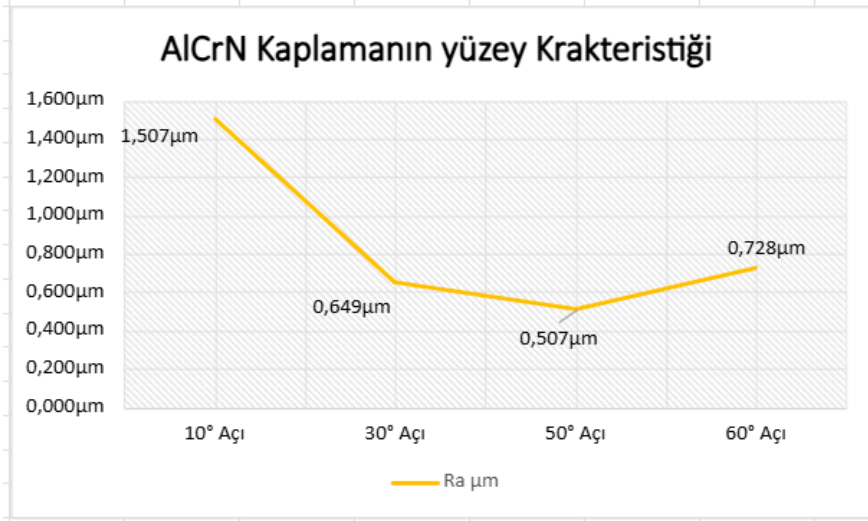
Şekil 6.29. AlCrN kaplanmış 10°,30°,50°,60° helisli frezelerin çelik ve takım üzerindeki sıcaklık değerleri

Şekil 6.30' da işlem sonrası alınan yüzey görselleri görülmektedir.



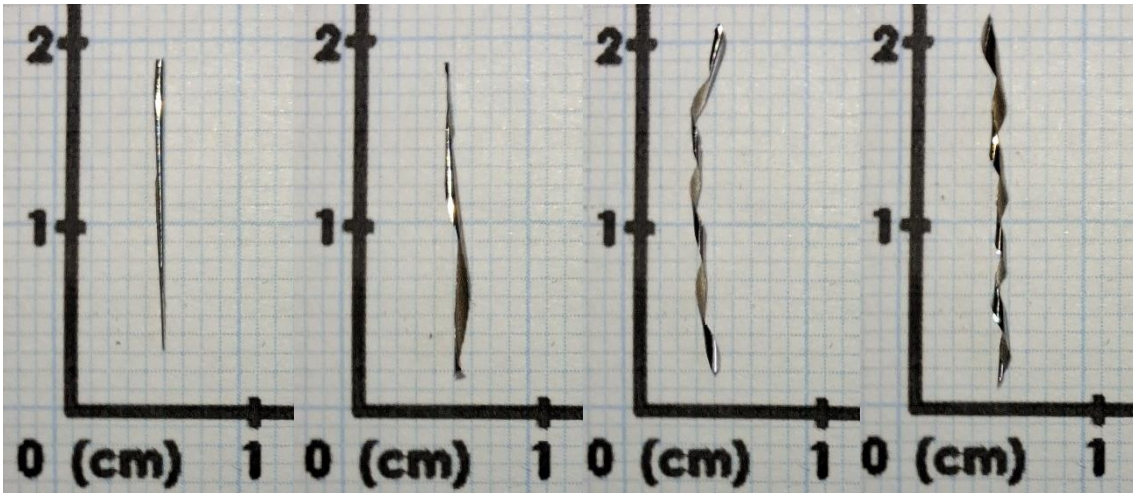
Şekil 6.30. AlCrN kaplanmış parmak freze ile işlenmiş malzemelerin yüzey görselleri

Şekil 6.31’ de AlCrN kaplamanın talaş kaldırdıktan sonra, çelik yüzey üzerinde meydana getirdiği Ra değeri görülmektedir. Ra değeri, yüzey kalitesi açısından önemli bir değerdir.



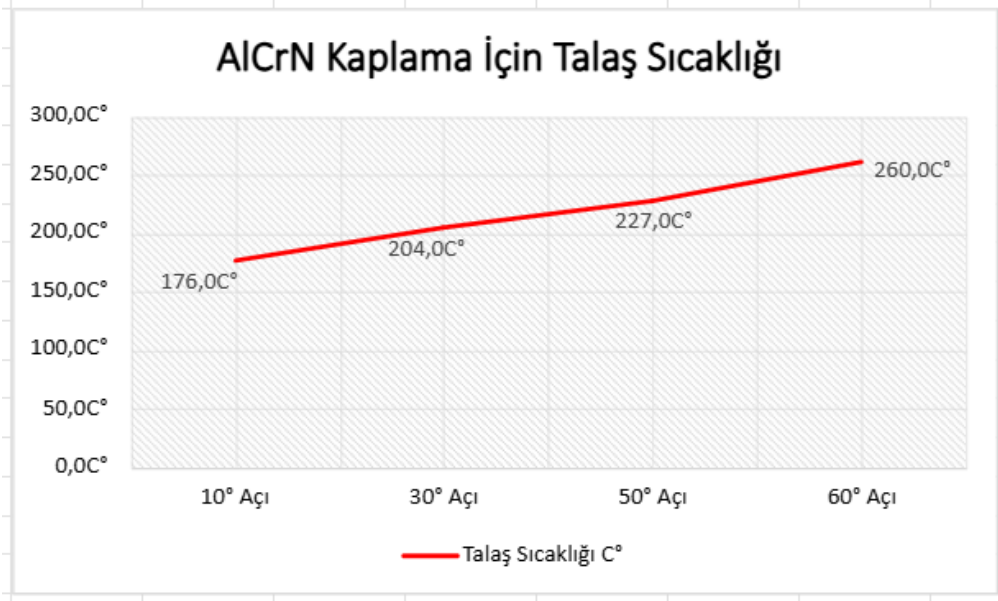
Şekil 6.31. 1040 çeliğinin AlCrN kaplamadaki helislere göre Ra cinsinden yüzey pürüzlülüğü grafiği

Şekil 6.32’ de AlCrN kaplanmış ve 10°, 30°, 50°, 60° helis açısıyla işlenmiş çelikten çıkan talaşın, ısı etkiye maruz kaldığı ve talaş renginin kahverengi olduğu görülmüştür, talaşın geometrik yapısının da ortalama 3° ile 45° arasında değişen bir helisli yapıya sahip olduğu görülmüştür.



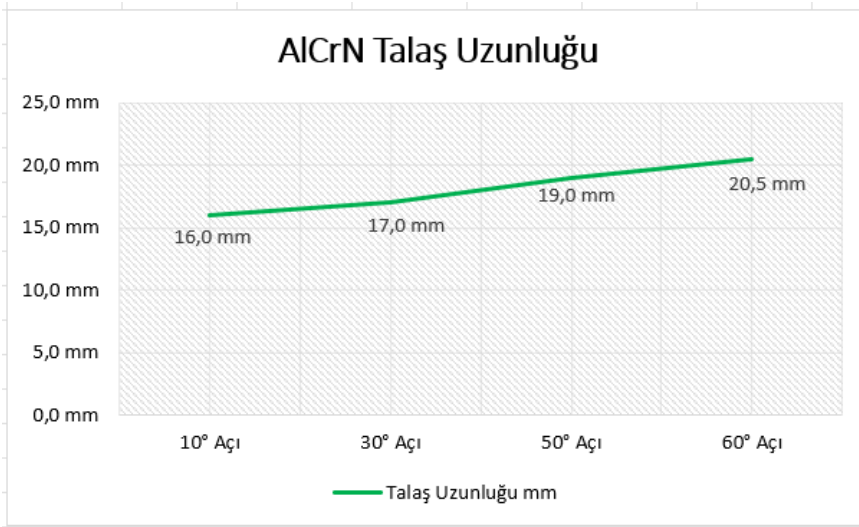
Şekil 6.32. AlCrN kaplanmış, sırasıyla 10°, 30°, 50°, 60° helis açılı parmak frezenin talaş yapısı ve rengi ve boyutu

Şekil 6.33' te görüldüğü üzere 10° helisli AlCrN parmak frezenin talaşı yaklaşık olarak 176C° civarındadır. 30° helisli ALCRN parmak frezenin talaşı yaklaşık 204° civarındadır. 50° AlCrN normal çelik rengini koruduğundan sıcaklık değeri 227° civarındadır. 60° AlCrN talaşında kahverengi renk görüldüğünden yaklaşık sıcaklığının 260° civarı olduğu görülmüştür. Ayrıca talaş boyları helis açısı arttıkça arttığı da görülmüştür.



Şekil 6.33. AlCrN talaş sıcaklıkları

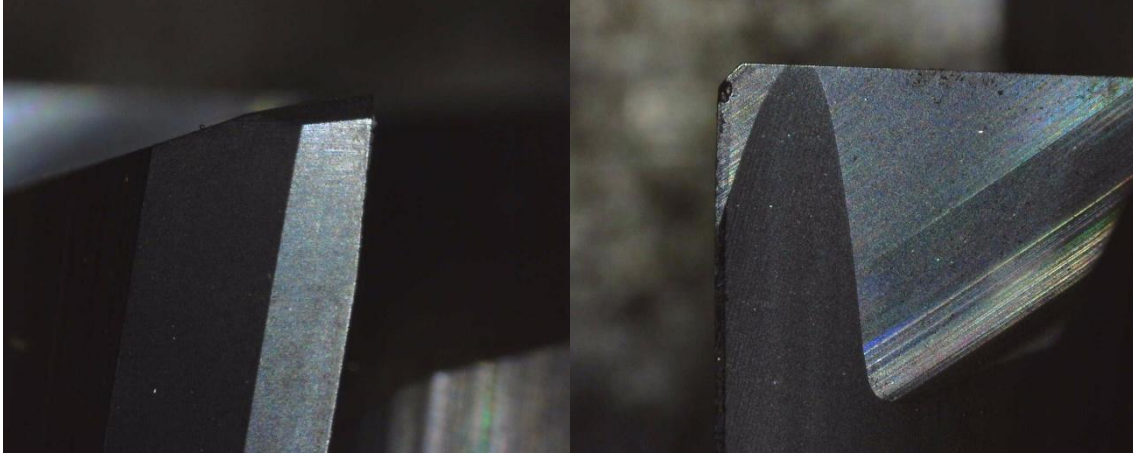
Şekil 6.34' te talaş uzunlukları sırasıyla 10° helis için 16mm, 30° helis için 17mm, 50° helis için 19mm, 60° helis için 20,5mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.34. AlCrN kaplama talaş uzunlukları

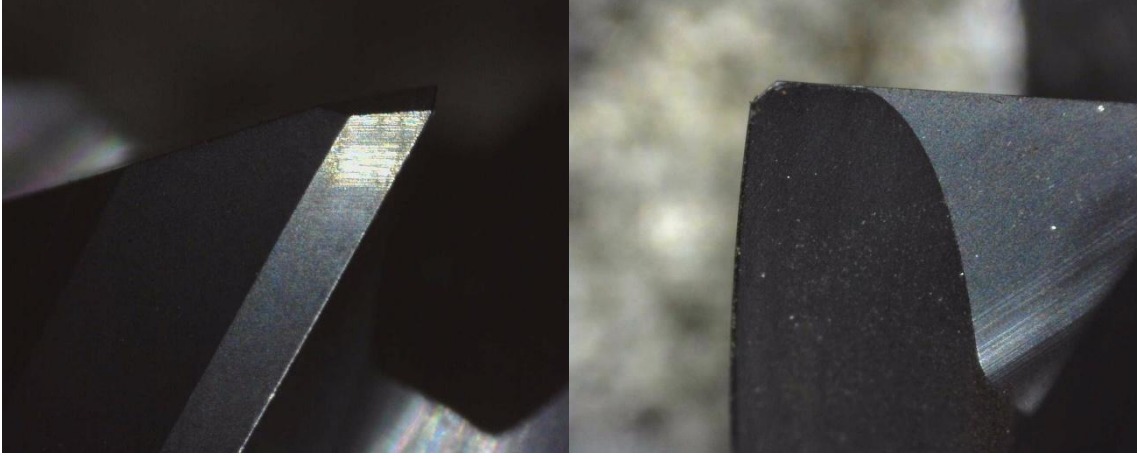
6.2.2.1 AlCrN kaplama için aşınma karakteristiği

Şekil 6.35’ te solda görünen resimde, yan kesme yüzeyinde herhangi bir aşınma görülmemiştir. Sağdaki görselde kesme kanalı içerisindeki detay görülmektedir. Bu detayda kaplama üzerinde renk farkı olduğu görülmüştür. Bu renk değişimi kesme sırasında talaş kaldırırken oluşan ısı ve sürtünmeden kaynaklı olduğu anlaşılmıştır. Bu renk değişiminin kesme performansına herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Yine sağdaki görselde frezenin keskin köşesinde 0,5mm’ lik erozyon aşınması görünmüş olup krater aşınması örneği görülmektedir.



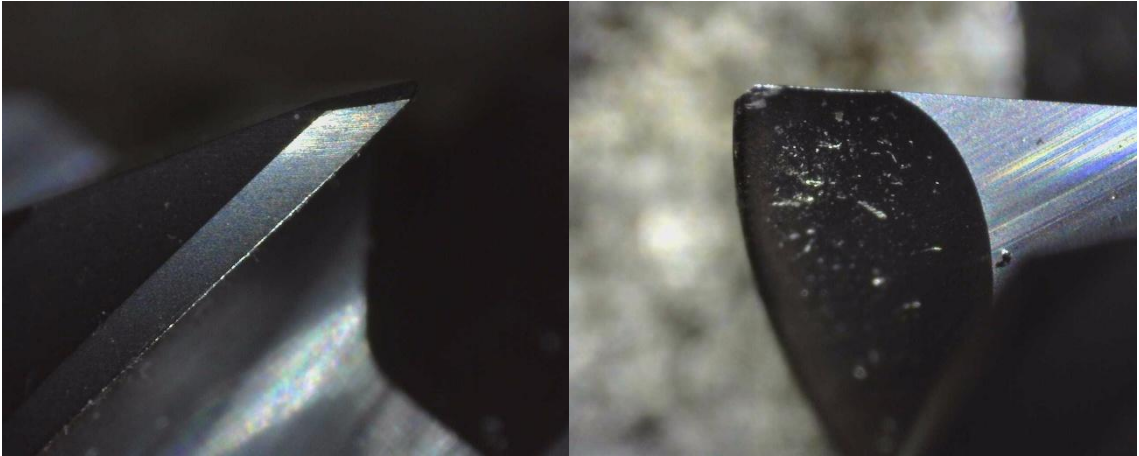
Şekil 6.35. AlCrN kaplanmış 10° parmak freze için aşınma görselleri

Şekil 6.36’ da yan kesme kenarında, kesme kanalında, alın kesme ağzında herhangi bir aşınma tespit edilmemiştir. Bu sonuç göstermiştir ki AlCrN kaplamalı 30° parmak frezenin aşınma direnci yüksektir. Şekilde ince çizgi halinde görülen parlamalar kaplamanın sürtünmeden kaynaklı parlamalarıdır. Bu görüntü talaş kaldırmış bir kesici takım için gayet normaldir ve herhangi bir aşınma göstergesi değildir. Bu görüntüsüyle takımın gayet başarılı bir kesme işlemi yürüttüğü söylenebilmektedir.



Şekil 6.36. AlCrN kaplanmış 30° parmak freze için aşınma görselleri

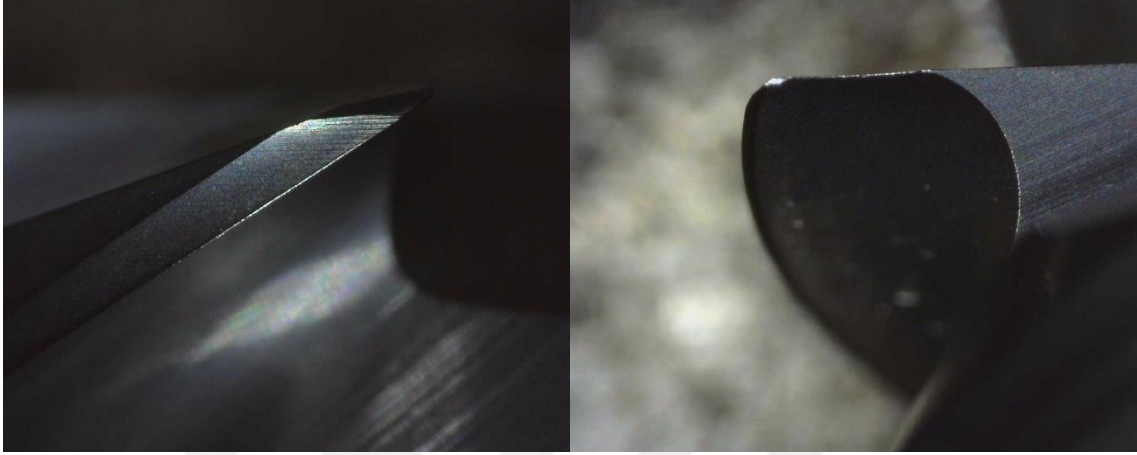
Şekil 6.37’ de solda görünen resimde, düzenli yan yüzey aşınması görülmektedir. Yanal kesme kenarı boyunca mikro düzeyde sıralı kırıklar mevcuttur. Resimde sağdaki görselde kesme kanalı içerisindeki detay görülmektedir. Bu detayda kaplama üzerinde renk farkı olduğu görülmüştür. Bu renk değişimi kesme sırasında talaş kaldırırken oluşan ısı ve sürtünmeden kaynaklı olduğu anlaşılmıştır. Sağdaki resimde alın kesme kenarında düzenli alın kesme kenarı kırığı tespit edilmiştir. Aşınma direnci olarak orta seviyede bir dayanımı olduğu görülmektedir.



Şekil 6.37. AlCrN kaplanmış 50° parmak freze için aşınma görselleri

Şekil 6.38’ de solda görünen resimde, düzenli yan yüzey aşınması minimal düzeyde görülmektedir. Resimde sağdaki görselde kesme kanalı içerisindeki detay görülmektedir.

Sağdaki resimde alın kesme kenarında derin olmayan aşınma ve kırıklar tespit edilmiştir. Sağdaki görselde kem kaplama kalkmış hem de parmak frezeden kopmalar meydana gelmiştir. Bu numune için kaplama ve helis açısı performansı alın aşınması durumundan dolayı aşınmaya tam dirençli olmadığı yorumu yapılabilmektedir.

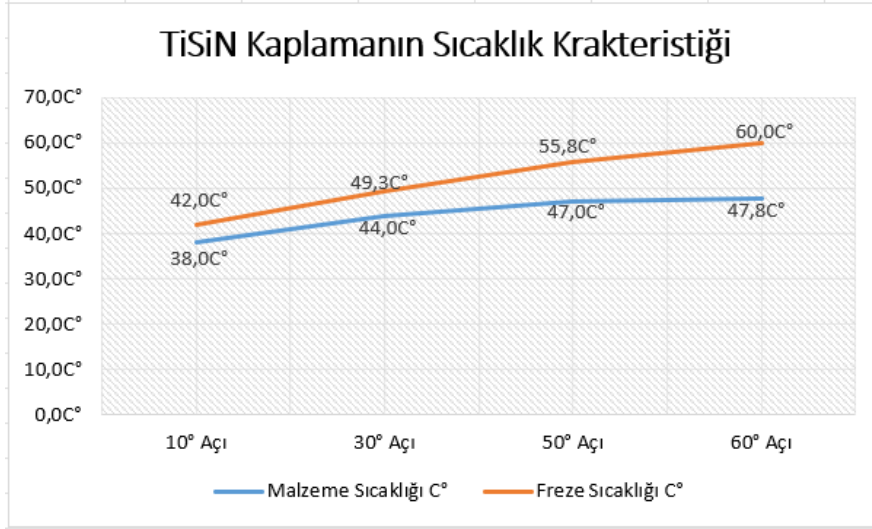


Şekil 6.38. AlCrN kaplanmış 60° parmak freze için aşınma görselleri

6.2.3. TiSiN kaplanmış parmak frezenin karakteristiği

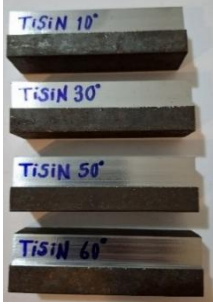
NC freze tezgahına bağlamış olduğumuz 1040 çeliğine TiSiN kaplama ile talaş kaldırma işlemi sonucunda hem çelik numunede hem de TiSiN kaplanmış parmak frezede ısınma meydana gelmiştir. Toplamda verilen 5mm'lik pasoda şekilde görülen sıcaklık değerleri her bir helis açısı için hem parmak frezeden hem de numune çelikten ölçüldüğünde Şekil 6.39' daki değerler görülmüştür.

Şekil 6.39' da da görüldüğü gibi helis açısı artan TiSiN kaplı parmak frezenin hem çelik hem de takımın sıcaklık değerlerinin paralel olarak arttırdığı görülmüştür. Bu şekil de diğer kaplamalardaki şekiller gibi paralel ısınma grafikleri oluşturmuştur. Helis açılarına bağlı olarak sıcaklığın yüksek helis açılarında artış göstermesi, kaplamadan bağımsız bir şekilde meydana geldiğini açıklar niteliktedir. Kaplama çeşidinin fark ettirdiği şey ise ölçülen sıcaklık değerlerindeki değişimdir.

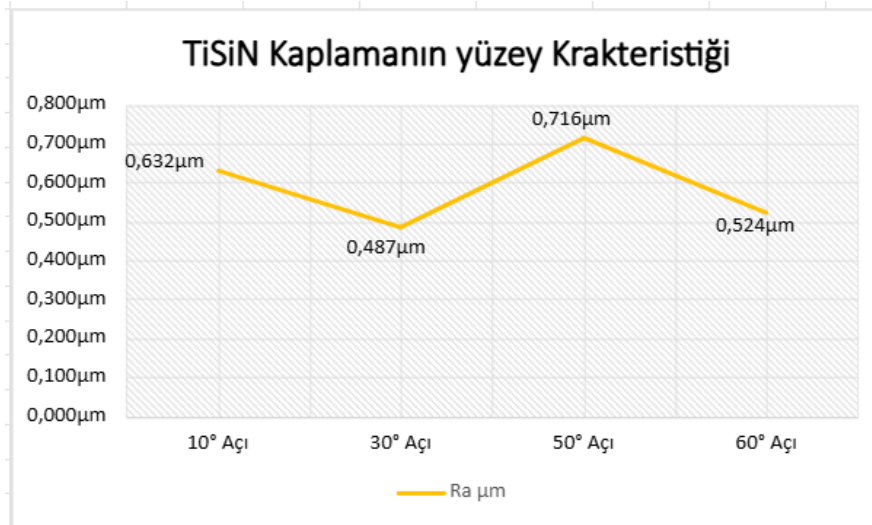


Şekil 6.39. TiSiN kaplanmış 10°,30°,50°,60° helisli frezelerin çelik ve takım üzerindeki sıcaklık değerleri

TiSiN kaplamanın 1040 çeliği üzerinden talaş kaldırma operasyonu sonrasındaki görüntüsü Şekil 6.40’ da gösterilmiştir. Şekil 6.41’ de de Ra değerleri gösterilmektedir.

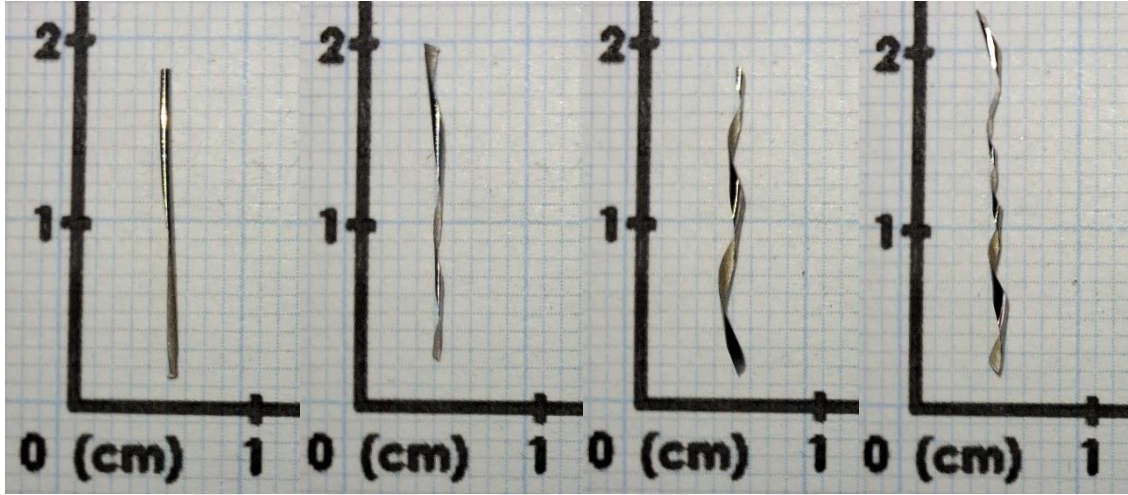


Şekil 6.40. TiSiN kaplanmış parmak freze ile işlenmiş malzemelerin yüzey görselleri



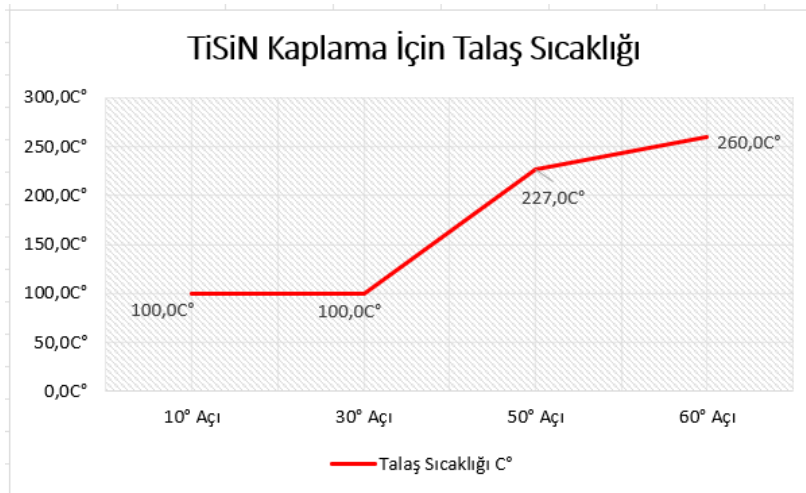
Şekil 6.41. 1040 çeliğinin TiSiN kaplamadaki helislere göre Ra cinsinden yüzey pürüzlülüğü grafiği

Şekil 6.42’ de TiSiN kaplanmış ve 10°,30°,50°, 60° helis açısıyla işlenmiş çelikten çıkan talaşın, ısı etkiye maruz kaldığı ve talaş renginin kahverengi olduğu görülmüştür, talaşın geometrik yapısının da ortalama 3 derece ile 45 derece arasında değişen bir helisli yapıya sahip olduğu görülmüştür.



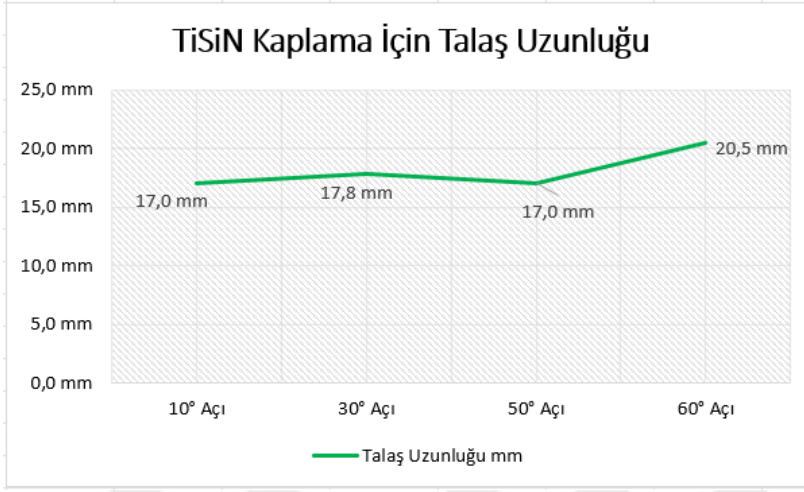
Şekil 6.42. TiSiN kaplanmış, sırasıyla 10°,30°, 50°, 60° helis açılı parmak frezenin talaş yapısı ve rengi ve boyutu

Şekil 6.43’ da görüldüğü üzere 10° helisli TiSiN kaplanmış parmak frezenin talaşı metal parlaklığını koruduğu için yaklaşık olarak 100C° civarındadır. 30° helisli TiSiN parmak frezenin talaşı da metal parlaklığında bir renk değişimi olmadığından yaklaşık 100° civarındadır. 50° TiSiN kaplamalı frezenin talaşı açık kahverengi bir renk aldığından dolayı sıcaklık değeri 227° civarındadır. 60° TiSiN talaşında koyu kahverengi renk görüldüğünden yaklaşık sıcaklığının 260° civarı olduğu görülmüştür.



Şekil 6.43. TiSiN talaş sıcaklıkları

Şekil 6.44’ de talaş uzunlukları sırasıyla 10° helis için 17mm, 30° helis için 17,8mm, 50° helis için 17mm, 60° helis için 20,5mm olarak ölçülmüştür.

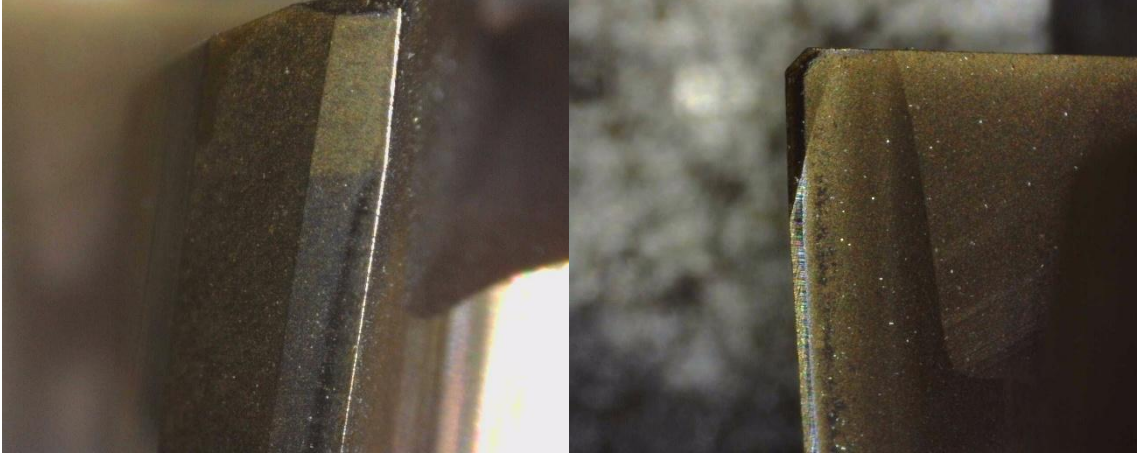


Şekil 6.44. TiSiN kaplama talaş uzunlukları

6.2.3.1. TiSiN kaplama için aşınma karakteristiği

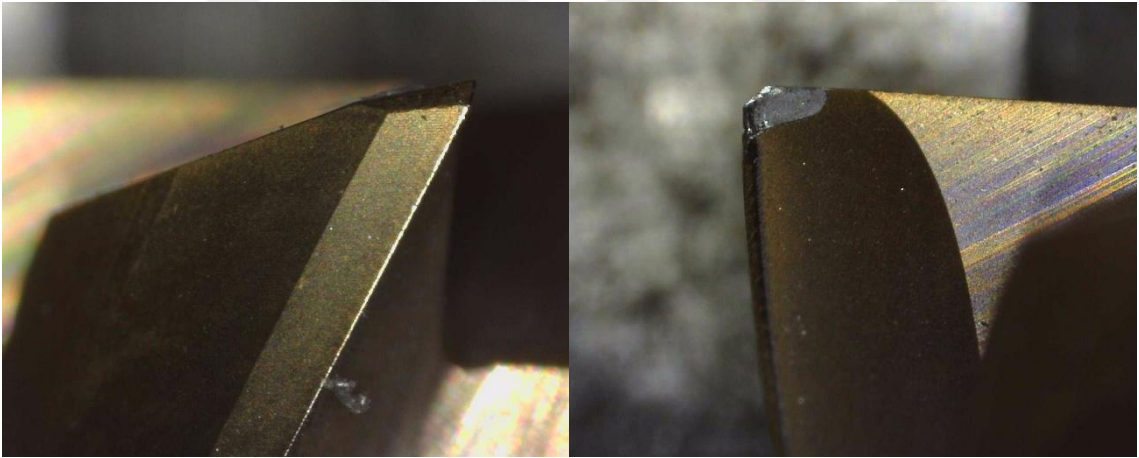
Şekil 6.45’ te solda görünen resimde, yan kesme yüzeyinde kaplamanın tüm kesme yüzeyi boyunca kalktığı görülmektedir. Ayrıca yan kesme kenarı boyunca mikro kırıkların ve aşınmaların olduğu görülmektedir. Bu detayda kaplama üzerinde renk farkı olduğu görülmüştür. Bu renk değişimi kesme sırasında talaş kaldırırken oluşan ısı ve sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda kesme kanalı içerisinde de kaplamanın boylu boyunca kalktığı fakat bu kalkmanın herhangi bir kırılmaya sebep olmadığı görülmüştür. Buradan çıkan sonuca göre, kesici takımın aslında koruyucu olarak duran kaplama kalkmasından dolayı kaplamanın artık görevini yerine getiremeyeceği ve takımın bu haliyle çalışmaya devam etmesi kısa sürede kırıkların oluşacağı anlamına gelmektedir.

Bu oluşacak kırıkların sonucunda da takım körelmesinin son derecede hızlanarak parmak frezenin zorlanarak kopmasına ve belki de işlediği parçanın bozulmasına sebebiyet verebilecektir.



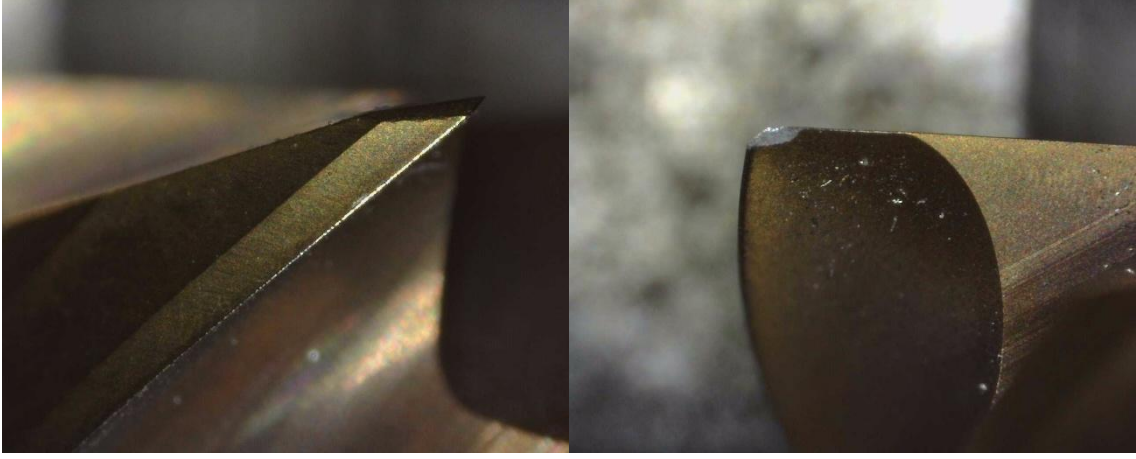
Şekil 6.45. TiSiN kaplanmış 10° parmak freze için aşınma görselleri

Şekil 6.46’ da yan kesme kenarında, kesme kanalında mikro düzeyde aşınma gerçekleşmişken, herhangi bir kırık tespit edilmemiştir. Fakat alındaki kesme kenarı kırığı çok derin olduğundan TiSiN kaplamanın 30° helisteki formunun aşınmaya karşı dayanıksız olduğu sonucunu göstermiştir.



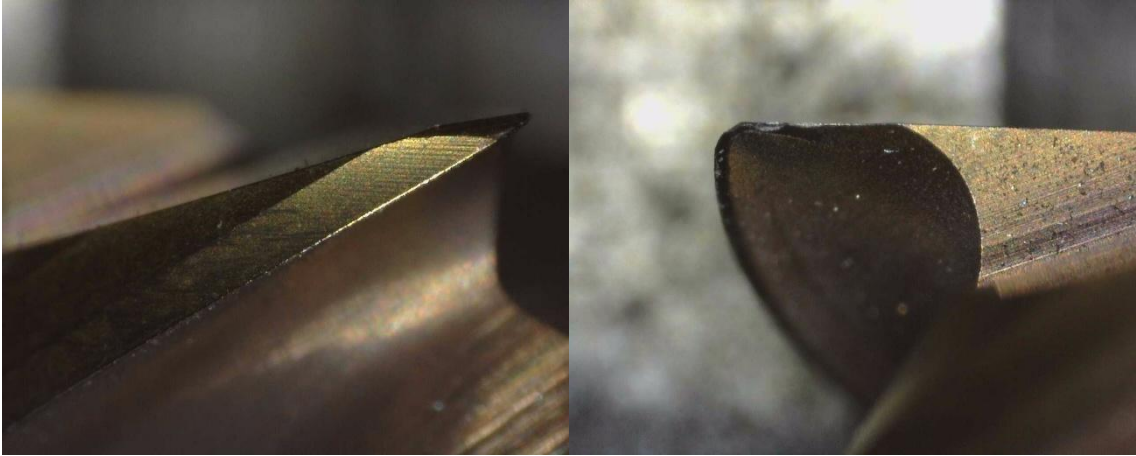
Şekil 6.46. TiSiN kaplanmış 30° parmak freze için aşınma görselleri

Şekil 6.47’ de solda görünen resimde, düzenli yan yüzey aşınması görülmektedir. Yanal kesme kenarı boyunca mikro düzeyde sıralı kırıklar mevcuttur. Yer yer makro kırıklar mevcuttur. Resimde sağdaki görselde kesme kanalı içerisindeki detay görülmektedir. Sağdaki resimde alın kesme kenarında kırık tespit edilmiştir. Bu kırık derin bir erozyon aşınmasına örnektir.



Şekil 6.47. TiSiN kaplanmış 50° parmak freze için aşınma görselleri

Şekil 6.48’ de solda görünen resimde, düzenli yan yüzey aşınması minimal düzeyde görülmektedir. Resimde sağdaki görselde kesme kanalı içerisindeki detay görülmektedir. Sağdaki resimde alın kesme kenarında derin olmayan düzenli aşınma ve kırıklar tespit edilmiştir.

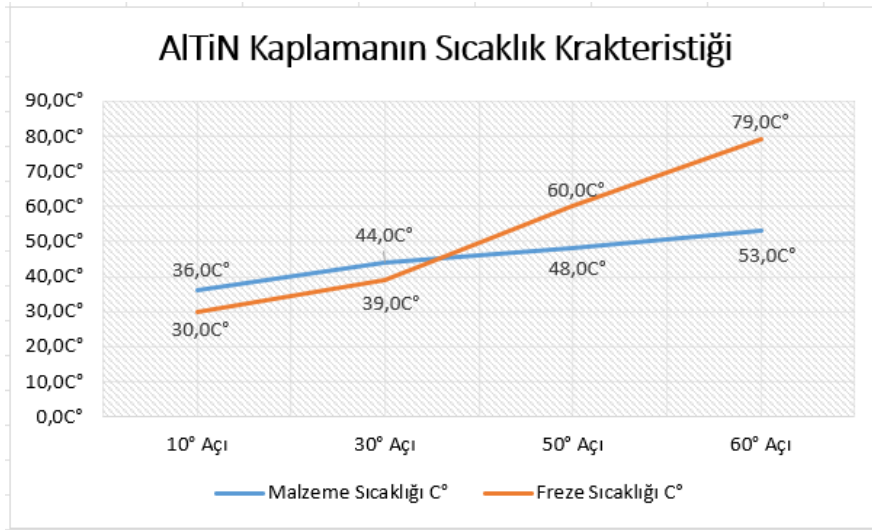


Şekil 6.48. TiSiN kaplanmış 60° parmak freze için aşınma görselleri

6.2.4. AlTiN kaplama işleminin karakteristik incelemesi

NC freze tezgahına bağlamış olduğumuz 1040 çeliğine AlTiN kaplama ile talaş kaldırma işlemi sonucunda hem çelik numunede hem de AlTiN kaplanmış parmak frezede ısınma meydana gelmiştir. Toplamda verilen 5mm’ lik pasoda şekilde görülen sıcaklık değerleri her bir helis açısı için hem parmak frezeden hem de numune çelikten ölçülmüştür.

Şekil 6.49’ da da görüldüğü gibi helis açısı artan AlTiN kaplı parmak frezenin hem çelik hem de takımın sıcaklık değerlerinin paralel olarak arttırdığı görülmüştür.

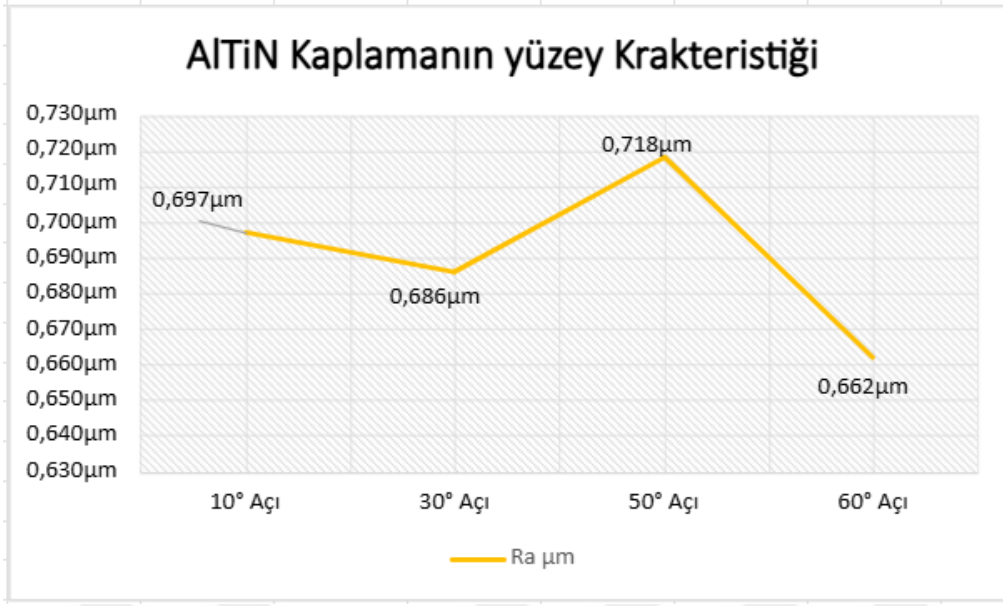


Şekil 6.49. AlTiN kaplanmış 10°,30°,50°,60° helisli frezelerin çelik ve takım üzerindeki sıcaklık değerleri

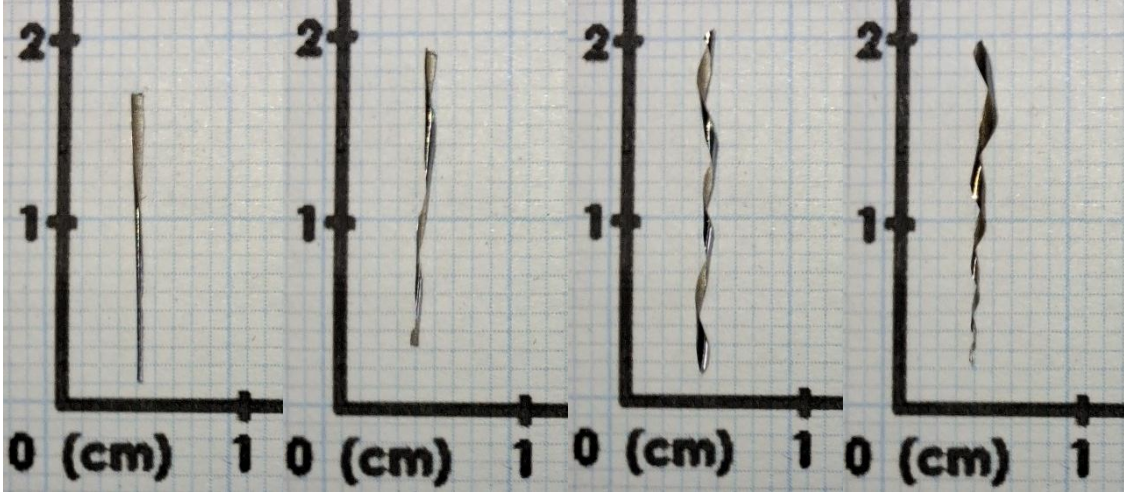
Şekil 6.50’ de AlTiN kaplanmış parmak frezelerin 1040 çeliği üzerindeki talaş kaldırma sonrası çekilen görselidir. Şekil 6.51’ de de parmak frezenin çelik yüzeyinde oluşturduğu yüzey pürüzlülük değerlerini göstermektedir.



Şekil 6.50. AlTiN kaplanmış parmak freze ile işlenmiş malzemelerin yüzey görselleri



Şekil 6.51. 1040 çeliğinin AlTiN kaplamadaki helislere göre Ra cinsinden yüzey pürüzlülüğü grafiği

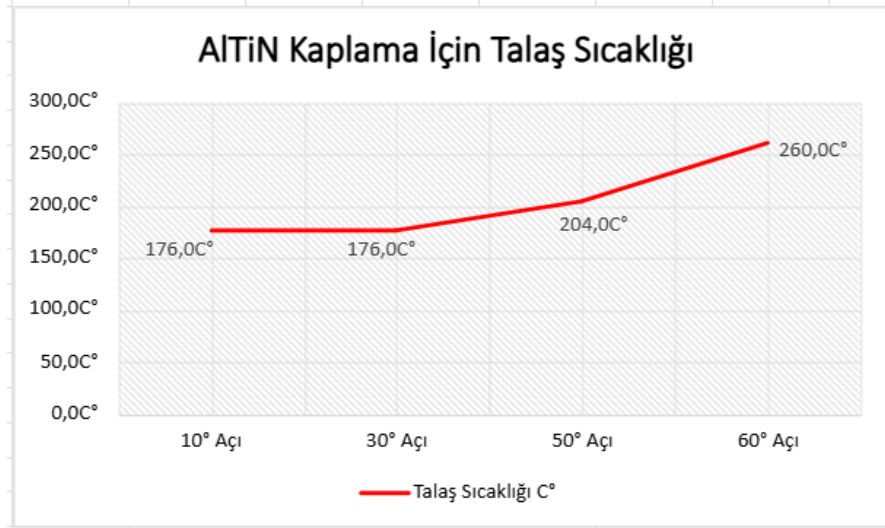


Şekil 6.52. AlTiN kaplanmış, sırasıyla 10°, 30°, 50°, 60° helis açılı parmak frezenin talaş yapısı ve rengi ve boyutu

Şekilde AlTiN kaplanmış ve 10°, 30°, 50°, 60° helis açısıyla işlenmiş çelikten çıkan talaşın, ısı etkiyle değişik renkler aldığı görülmüştür. Talaşın geometrik yapısının da ortalama 3 derece ile 45 derece arasında değişen bir helisli yapıya sahip olduğu görülmüştür.

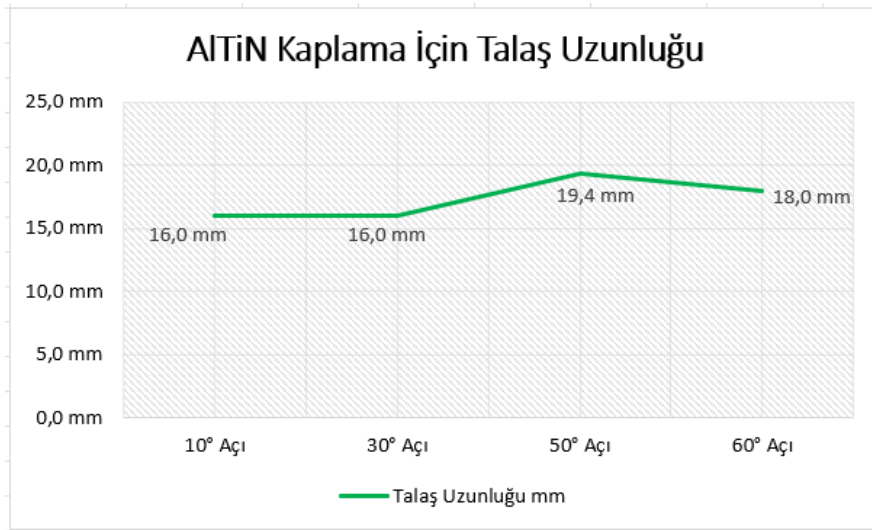
Şekil 6.52' de görüldüğü üzere 10° helisli AlTiN kaplanmış parmak frezenin talaşı koyu gri rene döndüğü için yaklaşık olarak 176°C civarındadır (Şekil 6.53). 30° helisli AlTiN parmak frezenin talaşı da koyu gri renkli olduğundan 176°C civarındadır. 50° AlTiN

kaplamalı frezenin talaşı açık kahverengi bir renk aldığından dolayı sıcaklık değeri 204C° civarındadır. 60° AlTiN talaşında koyu kahverengi renk görüldüğünden yaklaşık sıcaklığının 260C° civarı olduğu görülmüştür.



Şekil 6.53. AlTiN talaş sıcaklıkları

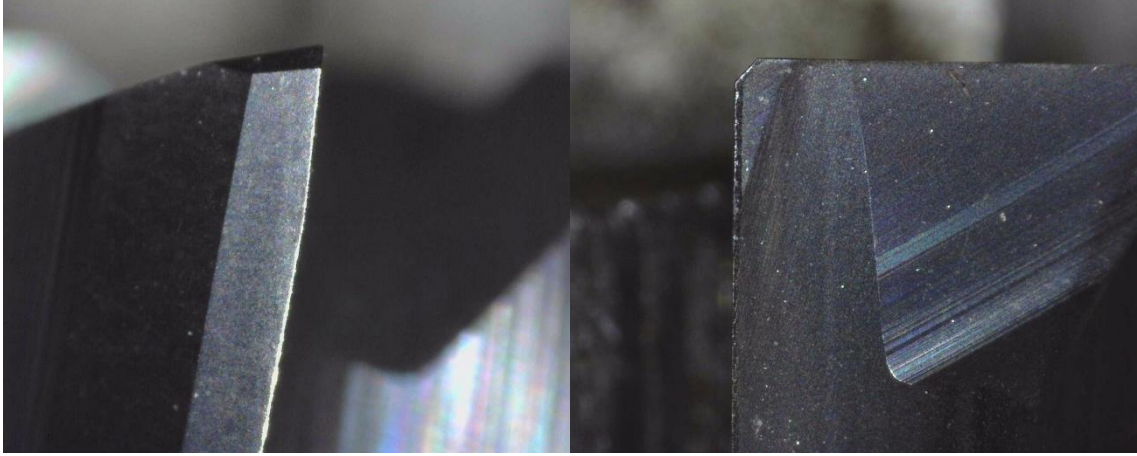
Talaş uzunlukları Şekil 6.54’ de gösterildiği gibi sırasıyla 10° helis için 16mm, 30° helis için 16mm, 50° helis için 19,4mm, 60° helis için 18mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.54. AlTiN kaplama talaş uzunlukları

6.2.4.1. AlTiN kaplama için aşınma karakteristiği

Şekil 6.55’ te solda görünen resimde, yan kesme kenarında kaplamanın tüm kesme yüzeyi boyunca düzenli yan yüzey aşınması tespit edilmiştir. Ayrıca yanal kesme kenarı boyunca mikro kırıkların ve aşınmaların olduğu görülmektedir. Bu detayda kaplama üzerinde renk farkı oluştuğu görülmüştür. Bu renk değişimi kesme sırasında talaş kaldırırken oluşan ısı ve sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda kesme kanalı içerisinde de tungsten malzeme üzerinden mikro parça kopmalarının olduğu tespit edilmiştir. Buradan çıkan sonuca göre, kesici takımın aslında koruyucu olarak duran kaplama kalkmasından dolayı takımın bu haliyle çalışmaya devam etmesi kısa sürede tamamen takımın köreleceğini gösteriyor.



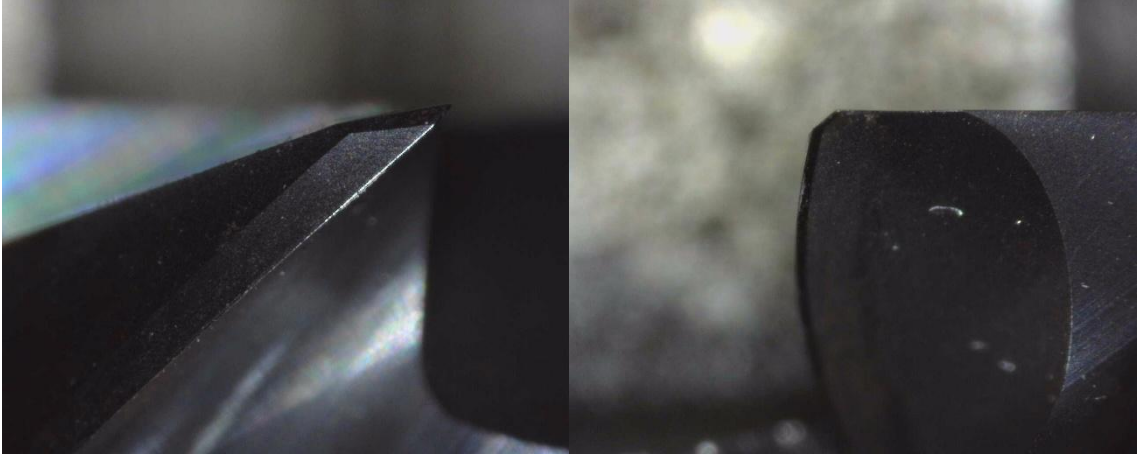
Şekil 6.55. AlTiN kaplanmış 10° parmak freze için aşınma görselleri

Şekil 6.56’ da yan kesme kenarında, kesme kanalında mikro düzeyde sadece kaplama kalkması görülürken, herhangi bir kırık tespit edilmemiştir. Alın kesme kenarında herhangi bir kaplama sorunu ve aşınma tespit edilmemiştir. Bu haliyle 30° helisli AlTiN parmak frezenin aşınma performansının çok iyi olduğu söylenebilir.



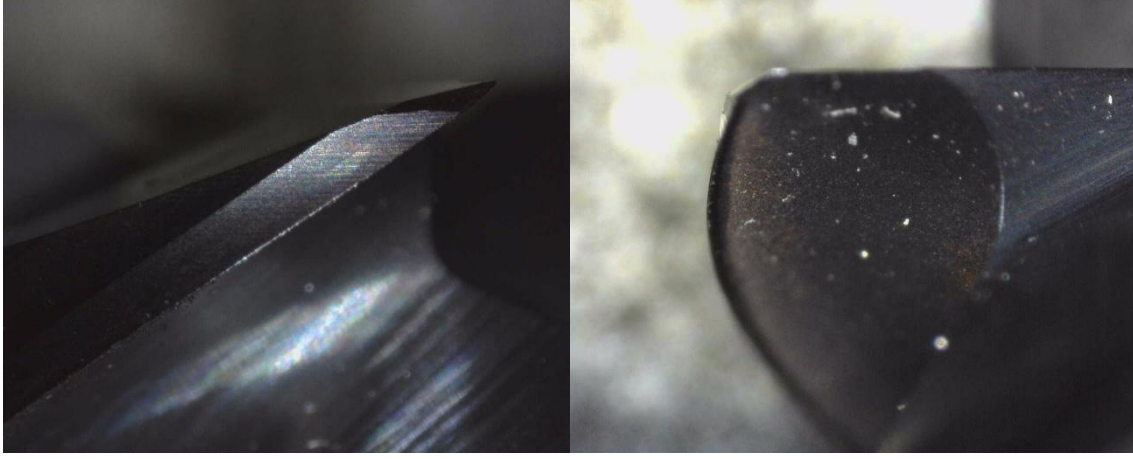
Şekil 6.56. AlTiN kaplanmış 30° parmak freze için aşınma görselleri

Şekil 6.57’ de solda görünen resimde, sadece kaplama aşınması görülmektedir. Yanal kesme kenarı boyunca herhangi bir kırık veya aşınma görülmemiştir. Kesme kanalında ve alın kesme kenarında herhangi bir aşınma görülmemektedir. Aşınma performansı yüksek seviyededir.



Şekil 6.57. AlTiN kaplanmış 50° parmak freze için aşınma görselleri

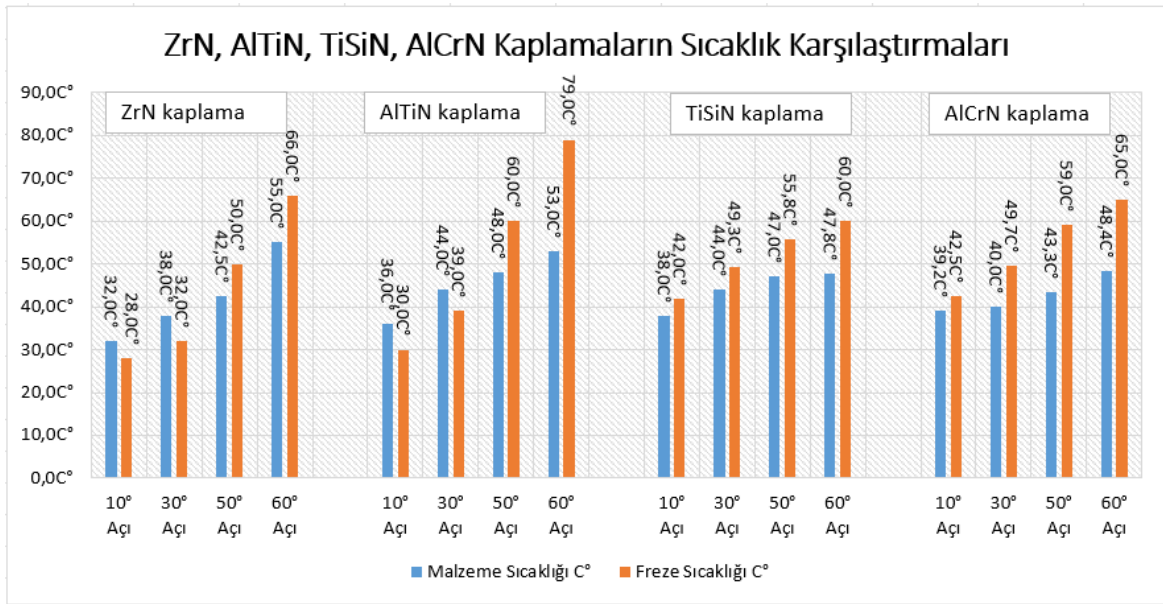
Şekil 6.58’ de solda görünen resimde, düzenli yan yüzey aşınması minimal düzeyde görülmektedir. Yer yer yan kesme kenarı boyunca mikro kırıklar da görülmektedir. Yine Şekil 6.58’de sağdaki görselde kesme kanalı içerisindeki detay görülmektedir. Sağdaki resimde alın kesme kenarında ve keskin köşede karbür malzemenin derin kopmalarının olduğu tespit edilmiştir. Aşınma performansı düşük bir kesici takım olarak nitelendirilebilir.



Şekil 6.58. AlTiN kaplanmış 60° parmak freze için aşınma görselleri

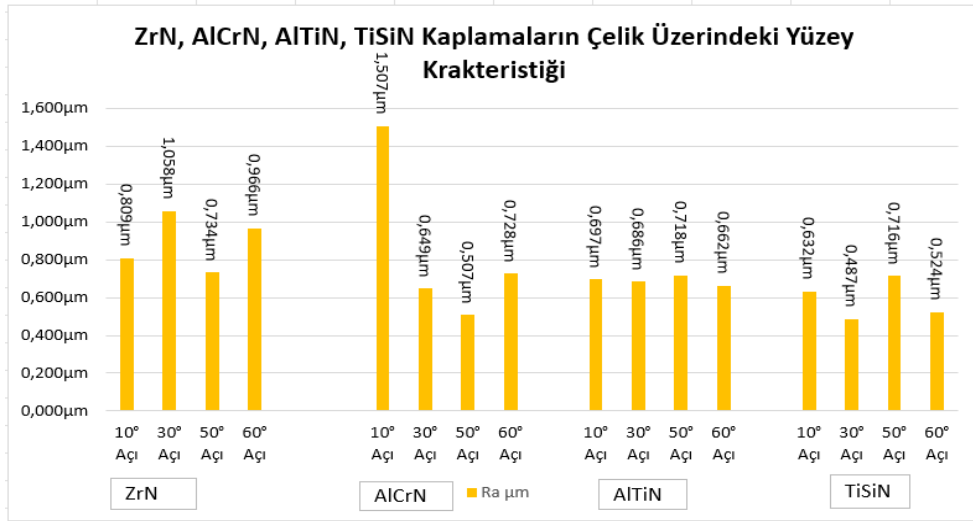
6.3. Tüm Analizlerin Kıyaslanması

Şekil 6.59’ da görüldüğü üzere, parmak frezenin en çok sıcaklığa maruz kaldığı kaplama ve açısı AlTiN 60° olmuşken, parmak frezenin en az ısındığı kaplama ve açısı ise ZrN 10° değeri olmuştur. Yine Şekil 6.59’ a bakılacak olursa, ZrN 60° değerinde de 1040 çeliğinin en çok ısındığını söyleyebiliriz. Çelik malzemenin en az ısındığı değer de, ZrN 10° olmuştur.



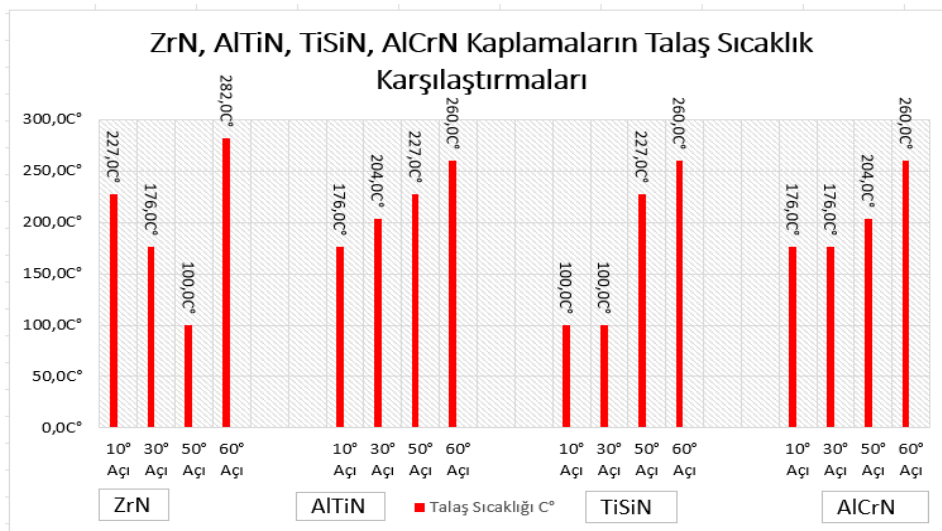
Şekil 6.59. Yapılan tüm kaplamaların sıcaklık karşılaştırmaları

Şekil 6.60' da görüldüğü üzere, parmak frezenin talaş kaldırma operasyonu sonrasında yüzey pürüzlülüğünün en az olduğu 0,487µm değeri ile, TiSiN kaplama ile 60° helis açısı olmuştur. En yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip değer ise 1,507µm değeri ile AlCrN 10° olduğu görülmüştür. Yine Şekil 6.60' a bakılacak olursa, en stabil yüzey pürüzlülük değeri AlTiN kaplamanın tüm helislerinde görülmüştür.



Şekil 6.60. Yapılan tüm kaplamaların çelik yüzeyindeki pürüzlülük değerleri karşılaştırmaları

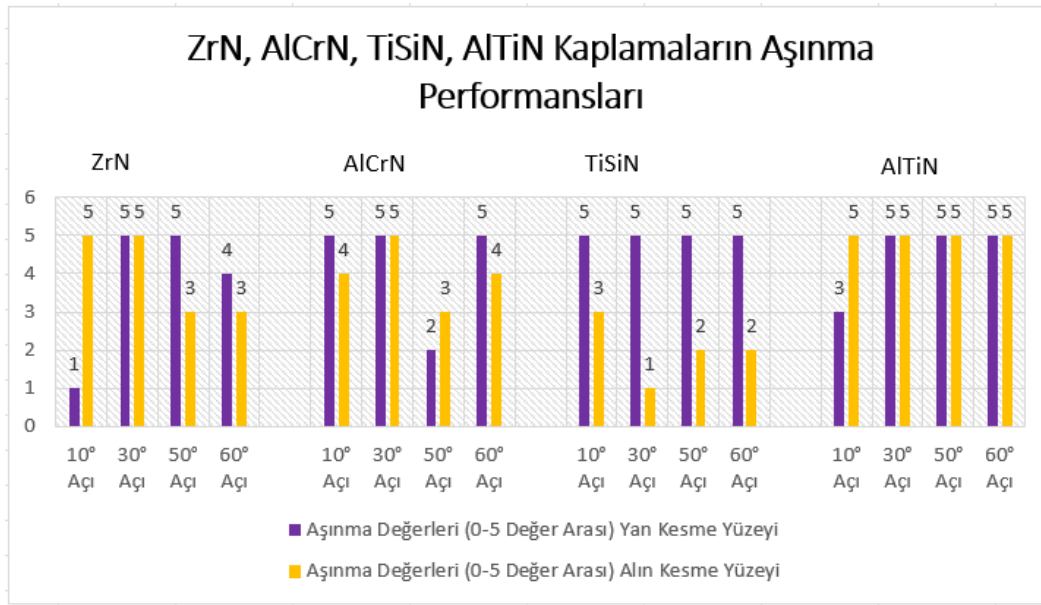
Şekil 6.61' de görüldüğü üzere tüm kaplamaların 60° helislerinde en yüksek talaş sıcaklıklarının olduğu görülmüştür. Bu 60° helislerdeki en yüksek sıcaklık değeri ise ZrN kaplamaya ait olduğu görülmüştür.



Şekil 6.61. Yapılan tüm kaplamaların talaş sıcaklık karşılaştırmaları

Şekil 6.62’ de tüm parmak frezelerin yanal ve alın kesme kenarına göre 0 (sıfır) ile 5 arasında bir değer verilmiştir. Bu verilen değer kesme kenarındaki kırık boyutuna, kaplama kalkmalarına, aşınma değerine göre verilmiştir. 5 en iyi performanslı (aşınmaya karşı dirençli, kırıksız), 0 (sıfır) ise performansı en düşük olarak değerlendirilmiştir.

Yine Şekil 6.62’ de AlTiN kaplamanın yanal ve alın kesme kenarının performans değerinin en iyi olduğu görülmüştür.



Şekil 6.62. Yapılan tüm kaplamaların aşınma performansları

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan tüm bu çalışmalar göstermiştir ki, parmak frezelerde helis açısı ve kaplama çeşitleri kesme performansı üzerinde çok farklı çıktılar vermektedir. Öncelikle helis açısının artmasıyla birlikte takımda ısınmalar meydana gelmiştir ve işlenen 1040 çeliğindeki sıcaklık da doğru orantılı olarak yükselerek çeliği daha fazla ısıtırmıştır. Ayrıca kaldırılan talaşın sıcaklığı da helis açısının artmasıyla birlikte aynı oranda artmıştır. Sonuçlar sunu da göstermiştir ki helis açısının artmasıyla birlikte artan sıcaklık, her kaplama için aynı olmamıştır. AlTiN' ü ele alacak olursak, diğer kaplamalara oranla 60°' lik helis açısında diğer kaplamalara göre en fazla parmak frezeyi ısıdan koruyamayan kaplama olmuştur (79C°). Bu da AlTiN' ün ısıyı hapsedip talaşla uzaklaştıramadığını göstermiştir.

Frezelerin işleme sonrası sıcaklıkları göz önünde bulundurulduğunda parmak frezenin en az ısındığı kaplama türü ZrN olmuştur. ZrN' ün 10° lik helis açısı için ölçülen sıcaklık değeri tüm sıcaklık değerleri arasındaki en düşük değer olarak ölçülmüştür (28C°). Sıcaklık değerinin bu kadar düşük çıkması WC parmak frezenin de kimyasal yapısını koruduğu gerçeğini bizlere vermiş olur.

1040 çeliği üzerinde işlem sonrası bakılan bir başka değer ise yüzey pürüzlülük (Ra) değeri olmuştur. Özellikle hassas yüzey işlemlerinde gerekli olan bu değer için TiSiN kaplanmış, 30° helis açısı için en pürüzsüz değer alınmıştır (0,487 µm). Bu değer bize göstermektedir ki, işlenecek parçada pürüzsüze yakın değer isteniyorsa 30°' lik açılı TiSiN kaplamalı parmak freze kullanılmalıdır. En pürüzlü yapı ise 10°' lik AlCrN' de karşımıza çıkmıştır (1.507 µm). Hassas toleransının korunması istenen bir parça için AlCrN kaplamalı parmak freze kullanmak boşuna olacaktır.

Yine ayrıntılı olarak analiz ettiğimiz SEM raporlarında da istediğimiz kaplama değerlerinin optimum aralıklarda olduğu ve kaplama yapışmalarının homojen şekilde kaplamanın her tarafında olduğu görülmüştür. Bu da kesme performansı için olumlu yönde gelişen bulgulardan biri olmuştur.

Tüm bu parametreler dışında en önemli bulgularımızdan biri de ürettiğimiz takımların aşınma değerleri olmuştur. Alınan ayrıntılı mikroskop kamera görüntülerinde kesici takımlarda çeşitli aşınma, kırıklar ve kopmaların meydana geldiği görülmüştür. Aşınma özellikle çalışmamızın ana maddelerinden biridir. Ayrıntılı görüntülemeler göstermiştir ki,

yanal kesme kenarı aşınmasına uğramayan parmak frezelerin alın kesme kenarında aşınmalar mevcuttur. Ya da bunun tam tersi durumların olduğu da görülmüştür. Örneğin: ZrN, AlCrN, TiSiN kaplamalı frezelerin tüm açıları için yanal ya da alın kesme kenarlarında derin aşınma izlerine denk gelinmiştir. Bu da kesme performanslarının zayıf olduğu anlamına gelmektedir. Aşınma değerlerinin en az olduğu parmak frezelerin AlTiN kaplamalı olduğu ve tüm helis açılarında bu değeri koruduğu ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak tüm bu çalışmalar göstermiştir ki AlTiN kaplamalı parmak frezelerin 1040 çeliği üzerindeki aşınma performansı en yüksek parmak freze çeşididir. Üretim süresi uzun olan 1040 çelik yapısındaki parçalar için takım körlenmesi olmadan uzun süreli çalışmaya uygundur. 1040 çeliğinde AlTiN kaplamalı parmak freze kullanımı gerek imalat maliyetlerinin düşmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca aşınarak performans düşmesine neden olan bir kesici takımın tezgahtan sökülüp yenisinin bağlanması ve tekrar ayar yapılma zorunluluğundan doğan zaman kayıplarının toplam maliyette gereğinden fazla artışa neden olacağından AlTiN kaplamalı parmak freze kullanmak bu gereksiz maliyetlerin ve zaman kaybının önüne geçilmesini sağlar.

8. KAYNAKLAR

- Alsaran, A., Çelik, A., Karakan, M., Yetim, F.,** 2002. Yüzey mühendisliğinde yeni bir yaklaşım; dubleks yüzey işlemi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi *Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 9 (1), s.1-7
- Altıntaş, Y.,** 2000. Manufacturing automation, Cambridge University Press, New York, USA. 382s.
- Altıntaş, Y.,** 2000. Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design, Cambridge University Press, Cambridge, USA. 382s.
- Aytaç, A., Uğur, M.,** 2018. Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemlerinden PVD ve JVD/DVD İnce Film Kaplamaların Karşılaştırılması ve DVD Kaplama Teknolojisinin Endüstriyel Uygulamaları Üzerine Kavramsal, Akademik ve Teorik Bir Analiz, *Savunma Bilimleri Dergisi*. 3254-3269s.
- Doğan, H.,** 2001 İyon beam implantasyon tekniği ile malzeme yüzeyinin modifikasyonu ve PVD ile karşılaştırılması. *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Kocaeli.
- Duran, A., Acır, A.,** 2004. HSS torna kalemindeki talaş açısının kesme kuvvetlerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*. 7 (3): 211-215
- Kıyak, M., Çakır, O., Altan, E.,** 2003. CVD ve PVD kaplama yöntemlerinin kesici takımlara uygulanması. II. *Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi MATİT*, Konya.
- Seymen, Y.,** 2009. Alüminyumun (Al7075) elmas benzeri karbon (DLC) kaplanmış parmak freze ile işlenmesinin deneysel incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Sönmezoğlu, S., Koç, M. ve Akın, S.,** 2012. İnce film üretim teknikleri. *Erciyes Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 28 (5), s.389-401
- Şafak, H. E.,** 2008. Yüzeyi PVD yöntemiyle kaplanmış metallerde tribolojik özelliklerin belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Türküz, M., C.,** 2006. Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile yapılan zirkonyum nitrid ince film kaplamanın kaplama parametrelerinin incelenmesi ve optimizasyonu. *Yayınlanmış Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Uçar, M., Ay, M.,** 1999. Parmak freze ile kanal ve alın yüzey işlemede takım eksenini ile işlenen yüzey arasındaki paralelliğin bozulmasına etki eden kesme parametrelerinin incelenmesi. *Makine-İmalat Sempozyumu*, Konya, 16 Ekim.
- URL-1,** 2024. <https://www.titanit.com.tr/pvd-kaplama/zafir-plus/>, Titanit Ultra Sert Kaplamalar Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. 11 Nisan 2024.

- URL-2**, 2024. <https://www.titanit.com.tr/pvd-kaplama/super-tin/>, Titanit Ultra Sert Kaplamalar Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. 11 Nisan 2024.
- URL-3**, 2024. <https://www.titanit.com.tr/pvd-kaplama/moldex-ekstra/>, Titanit Ultra Sert Kaplamalar Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. 11 Nisan 2024.
- URL-4**, 2024. <https://www.titanit.com.tr/pvd-kaplama/alterna/>, Titanit Ultra Sert Kaplamalar Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. 15 Nisan 2024.
- URL-5**, 2024. <https://www.titanit.com.tr/pvd-kaplama/preventa/>, Titanit Ultra Sert Kaplamalar Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. 16 Nisan 2024.
- URL-6**, 2024. <https://www.titanit.com.tr/pvd-kaplama/onyx/>, Titanit Ultra Sert Kaplamalar Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. 16 Nisan 2024.
- URL-7**, 2024. <https://www.titanit.com.tr/pvd-kaplama/potentia/>, Titanit Ultra Sert Kaplamalar Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. 16 Nisan 2024.
- URL-8**, 2024. <https://www.titanit.com.tr/pvd-kaplama/mold-plast/>, Titanit Ultra Sert Kaplamalar Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. 18 Nisan 2024.
- URL-9**, 2025. <https://www.mytech-cnc.com/en/products/nc-milling-machine-sz-2200h-vsd-nc>, Shou Zuan Machinery Co. Ltd. 19 Mayıs 2025.
- URL-10**, 2025. <https://www.testo.com/tr-TR/testo-872/p/0560-8721>, Testo Türkiye. 19 Mayıs 2025.
- URL-11**, 2025. <https://www.unitturkiye.com/urun/unit-ut306s-kizilotesi-termometre>, Perpa Otomasyon Sanayi Ticaret LTD. ŞTİ. 19 Mayıs 2025.
- URL-12**, 2025. <https://mitutoyo.eu/>, Mitutoyo Avrupa GmbH. 19 Mayıs 2025.
- URL-13**, 2025. <https://www.dino-lite.com/index.php>, Dino-lite Co. 19 Mayıs 2025.
- URL-14**, 2025. https://www.youtube.com/watch?v=SqZ6Ff5_gXU, Micheal Deckel Co. 19 Mayıs 2025.
- URL-15**, 2025. <https://www.toolskit.com/product/resin-bond-diamond-wheel/>, Norton Diamond Co. 19 Mayıs 2025.
- URL-16**, 2025. <https://www.machinemfg.com/tr/milling-cutters-types-uses-and-selection-principles/>, Machine MFC. 19 Mayıs 2025.
- URL-17**, 2025. <https://www.reliance-foundry.com/blog/tempered-steel>, Reliance Foundry. 19 Mayıs 2025.
- Yüksel, H., Özgünay, A.**, 2023. Kaplamaların kesici takımlar üzerinde etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, *Bitirme Tasarım Projesi*. s.3-15.

