

**AISI 1045 ÇELİĞİNİN MEKANİK ALAŞIMLANMIŞ
DEMİR ESASLI TOZLAR İLE KAPLANMASI VE AŞINMA
DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

Gökçen AKGÜN

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd.Doç.Dr. Cihan ÖZEL
Mayıs-2012**

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AISI 1045 ÇELİĞİNİN MEKANİK ALAŞIMLANMIŞ DEMİR ESASLI TOZLAR İLE
KAPLANMASI VE AŞINMA DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökçen AKGÜN

091120102

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Programı: Konstrüksiyon ve İmalat

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Cihan ÖZEL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 15 Mayıs 2012

MAYIS-2012

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AISI 1045 ÇELİĞİNİN MEKANİK ALAŞIMLANMIŞ DEMİR ESASLI TOZLAR İLE
KAPLANMASI VE AŞINMA DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Gökçen AKGÜN

(091120102)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Mayıs 2012
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Mayıs 2012

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Cihan ÖZEL (F.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. S.Osman YILMAZ (F.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. Haşim PIHTILI (F.Ü.)



Mayıs-2012

ÖNSÖZ

Mekanik alaşımlanmış demir esaslı tozlarla hazırlanan kaplamaların aşınma davranışını incelediğim bu çalışmanın, hazırlık aşaması ve karakterizasyonu Fırat Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümündeki laboratuvar imkanları kullanılarak sağlanılmıştır. Ardından üretmiş olduğum tozların kaplama operasyonları Prokap Makine bünyesindeki Flame Spray (Alev Püskürtme) Cihazında gerçekleştirilmiştir. Kaplanmış numunelerin aşınma deneyleri de Fırat Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarındaki cihazların kullanımı ile sağlanılmıştır.

Bu çalışmayı öneren, çalışmalarımda beni her zaman büyük özveriyle destekleyen ve çalışmamın bütün aşamalarında gösterdiği ilgi ile her türlü yardımı gösteren değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Cihan ÖZEL 'e en içten duygularıyla teşekkür ederim. Fırat Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliğinin laboratuvar imkanlarını sınırsızca kullanımına açan, çalışmalarım sırasında mühendisliğimin gelişmesinde katkı sağlayarak engin bilgisini ve tecrübesini hiçbir zaman esirgemeyen ve gösterdiği ilgi ile çalışmanın amacına ulaşmasını sağlayan değerli hocalarım Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ 'a ve Prof. Dr. Mustafa AKSOY 'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine de teşekkür ederim.

Kaplama üretiminin gerçekleştirilmesi için Prokap Firmasının imkanlarını kullanmamı sağlayan sayın Yaşar ÇELİK ve Yılmaz ÇELİK Bey'e çalışmamda verdiği destekten dolayı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, bu çalışma süresince maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen ve makine mühendisliğini hayatının içerisinde benimseyen sevgili anneme ve çalışmalarımın analizlerini almamda yardımcı olan Uzman Metalürji ve Malzeme Mühendisi sayın hocam Selçuk KARATAŞ' a ve Dr. Tanju TEKER' e çok teşekkür ederim. Ayrıca her zaman yanımda olan canım arkadaşım Arş.Gör.İbrahim KOCABAŞ' a da teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım vermiş oldukları desteklerden dolayı FÜBAP birimine de teşekkürlerimi sunarım.

Gökçen AKGÜN

Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
İÇİNDEKİLER.....	II
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ	XI
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XIII
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	3
3. SÜPER ALAŞIMLAR.....	12
3.1. Süper Alaşımların Metalürjisi.....	15
3.2. Süper Alaşımların Sınıflandırılması	16
3.2.1. Kobalt Esaslı Süper Alaşımlar	17
3.2.2. Demir Esaslı Süper Alaşımlar.....	17
3.2.3. Alüminyum Esaslı Süper Alaşımlar.....	18
3.2.4. Magnezyum Esaslı Süper Alaşımlar	18
3.2.5. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar	19
4. MEKANİK ALAŞIMLAMA.....	20
4.1. Mekanik Alaşımlamada Mikroyapı	24
4.2. Mekanik Alaşımlamanın Uygulama Alanları	24
4.3. Mekanik Alaşımlama Deney Parametreleri	25
4.3.1. Öğütücü Tipi	26
4.3.2. Öğütme Tankı	26
4.3.3. Öğütme Hızı.....	26
4.3.4. Öğütme Zamanı	27
4.3.5. Öğütücü Madde.....	28
4.3.6. Toz-Bilya Ağırlık Oranı.....	29
4.3.7. Öğütme Kabı Doluluk Miktarı.....	30
4.3.8. Öğütme Sıcaklığı	30
4.3.9. İşlem Kontrol Kimyasalı (İKK)	31
5. YÜZEY KAPLAMA İŞLEMLERİ VE AMACI.....	33

	<u>Sayfa No</u>
5.1. Sert Kaplama.....	34
5.2. Dolgu Kaplama	35
5.3. Koruyucu Kaplama	35
5.4. Kademeli Kaplama.....	35
5.5. Yüzey Kaplama Malzemeleri	36
6. YÜZEY KAPLAMA YÖNTEMLERİ	37
6.1. Buhar Fazı Yöntemleri.....	38
6.2. Sıvı Faz Esaslı Yöntemler.....	39
6.2.1. Sol Jel Yöntemi.....	39
6.3. Ergitme Esaslı Kaplamalar	40
6.3.1. Lazer İle Yüzey Kaplama	40
6.3.2. Toz Altı Kaynağı İle Kaplama	41
6.3.3. Gaz Tungsten Ark (GTA veya TIG) ile Kaplama	42
6.4. Ergimiş veya Yarı Ergimiş Fazdan Üretilen Kaplama.....	43
6.4.1. Isıl Püskürtme Yöntemleri (Termal Sprey).....	43
7. TOZ ALEV PÜSKÜRTME TEKNİĞİ.....	58
7.1. Yüzey Kaplama Öncesi Yapılan Uygulamalar	59
7.1.1. Optimum Püskürtme Parametreleri.....	62
8. AŞINMA pRENSİBİ VE TEORİSİ.....	65
8.1. Aşınma Direncine Karbürlerin Etkisi	67
8.2. Aşınma Direncine Matrisin Etkisi.....	67
8.3. Aşınma Zaman İlişkisi	68
8.4. Aşınma Mekanizmaları	69
8.4.1. Adhesiv Aşınma.....	69
8.4.2. Abrasiv Aşınma	70
8.4.3. Yorulma Aşınması	71
8.4.4. Erozif Aşınma	72
8.4.5. Korozyon Aşınması	72
8.5. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri.....	73
8.5.1. Aşınma Deneyleri	73
8.5.2. Aşınma Ölçüm Yöntemleri	75
9. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	77

	<u>Sayfa No</u>
9.1. Kaplama Tozları ve Kaplama Altlık Malzemesi	77
9.2. Takviye Tozlarını Mekanik Alaşımlandırma İşlemi	79
9.3. Altlık Malzemelerin Kaplama İşlemine Hazırlanması.....	81
9.4. Kaplama İşleminin Uygulanması.....	82
9.5. Kaplama Numunelerinin Yüzey Pürüzlülüklerinin Ölçülmesi	84
9.6. Kaplama Numunelerinin İncelenmeye Hazırlanması	85
9.7. Kaplama Numunelerinin Metalografik Yapı Analizi.....	86
9.8. Kaplama Numunelerinde Mikro Sertlik Analizlerinin Yapılması	86
9.9. Deney Numunelerinin Adhesiv Aşınma Testleri	86
10. DENEYSEL SONUÇLAR	88
10.1. Mekanik Alaşımlanmış Tozların İncelenmesi	88
10.2. Deney Numunelerinin Metalografik Yapı Analiz Sonuçları	96
10.3. Mikro Sertlik Deney Sonuçları	102
10.4. Deney Numunelerinin Adhesiv Aşınma Deney Sonuçları	105
10.4.1. Aşınma Deney Numunelerinin Sürtünme Katsayıları	111
10.4.2. Aşınma Deney Numunelerinin Optik Görüntüleri	112
11. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	127
12. KAYNAKLAR	130

ÖZET

Bu çalışma, kendi içerisinde üç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, hazır alınmış Metco 350 NS ve Metco 101 SF tozları sırasıyla ağırlık bazında %10 ve % 90 oranlarında 60 saat boyunca 450 dev/dk hızla dönen yüksek enerjili bir öğütücüde mekanik alaşımlamaları gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada mekanik alaşımlanmış bu süper alaşımlı tozlar, hazır alınmış demir esaslı Metco 350 NS tozu içerisine yine ağırlık bazında %5, %10 ve %15 oranlarında takviyeleri yapılmıştır. Ardından hiç takviye yapılmamış demir esaslı tozlar ile takviyeli demir esaslı tozları AISI 1045 malzemesi yüzeyine toz alev püskürtme tekniği kullanılarak kaplamaları gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise kaplamalı yüzeyler, kuru sürtünme şartlarında blok on disk aşınma test cihazında aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kaplamalı yüzeyler, mikro sertlik ölçümlerine de tabi tutulmuştur. Tozların mekanik alaşımlanmasını göstermek için SEM analizlerinin yanı sıra hem kaplama yüzeyinin hem de aşınmış yüzeylerin optik mikroskoptan görüntüleri alınmıştır.

Yine yapılan çalışmada, takviye oranına bağlı olarak sertlik değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Kaplamalı yüzeylerden alınan optik görüntülerde, porozite yoğunluğuna rastlanmıştır. Aşınma numuneleri incelendiğinde ise %15 takviye oranı dışında diğer takviyeli numunelerin sertlikle paralel bir şekilde aşınma dirençlerinin arttığı ve altlık malzemeye göre çok daha yüksek olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Demir Esaslı Süper Alaşım, Mekanik Alaşımla, Kaplama, Alev Püskürtme, Adhesiv Aşınma

SUMMARY

Coating AISI 1045 Steel with Iron Based Super Alloys and Investigating of Wear Behaviours

This study consists of three different stages. In the first part, mechanical alloying of supplied Metco 350 NS and 101 SF powders with a weight ratio of 10% and 90% respectively, are accomplished in a high energy milling machine at a speed of 450rpm for 60 hours. In the second part, the mechanically alloyed super powders are reinforced with the supplied iron based Metco 350 NS powders at the weight ratios of 5%, 10% and 15%, respectively. Then, coatings of the unreinforced iron based powders and reinforced iron based powders on the surface of AISI 1045 base material are performed by the powder flame spray process. Consequently, the wear experiments of the coated surfaces are performed on a the block-on-disc experimental setup at the dry friction conditions. In addition, coated surfaces are subjected to micro hardness tests. The photos of microstructure of coated and worn surfaces are taken in optic microscopy in addition to SEM images in order to analyze mechanical alloying of the coated powders.

As a result of the study, micro hardness values of the coatings are observed to be increasing depending upon reinforcement weight ratio. In the optical images taken from the coated surfaces, a porosity intensity is observed. A proportionality between the hardness and wear resistance for the coatings are observed and become higher than previous coating having lower reinforcement material excepting the one including 15% weight ratio.

Keywords: Iron Based Super Alloys, Mechanical Alloy, Coating, Flame Spray, Adhesive Wear

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Al_2O_3 tozlarının farklı kaplama teknikleri ve kaplama mesafelerine göre.....	9
Şekil 2.2. CeO_2 katkılı ve katkısız demir esaslı alaşım kaplamaların aşınma dayanımlarının mukayese edilmesi [31].	10
Şekil 3.1. Inconel MA 754'den yapılmış bazı gaz türbini parçaları [41].	12
Şekil 3.2. F119 Gaz türbini motoru - süper alaşımların kullanıldığı bir sistem [43].....	13
Şekil 3.3. Kullanım alanlarına göre süper alaşım tüketim oranları [40].....	14
Şekil 3.4. Kobalt esaslı süper alaşımlı üretilen implant bölgeleri [43].....	14
Şekil 3.5. Süper alaşımların sınıflandırılması [42].	16
Şekil 4.1. Yüksek enerjili atritörün 3D şematik görünümü [49].	20
Şekil 4.2. Bilye-bilye çarpışması esnasında arada kalan toz parçacıklar [48].....	21
Şekil 4.3. M.A. işlemi boyunca toz boyutunun öğütme süresine bağlı değişimi [48].....	22
Şekil 4.4. Atritör cihazında tozların öğütme süresine bağlı şematik gösterimi [50].	22
Şekil 4.5. M.A. sırasında kaynaklaşmanın şematik gösterilişi [10].	23
Şekil 6.1. Yüzey kaplama yöntemleri [19]	37
Şekil 6.2. Lazer kaplama işleminin şematik gösterilişi [19].....	41
Şekil 6.3. Isıl püskürtme işlem sırası [61].	44
Şekil 6.4. Termal püskürtme yöntemlerinin gösterilişi [19].....	45
Şekil 6.5 Çarpma kuvvetine bağlı olarak ergimiş partikülün yüzeyde levha şeklini alması [62,63].	45
Şekil 6.6 Termal püskürtme kaplama yapısı [62,63].....	45
Şekil 6.7. İş parçası yüzeyinin termal spreyle kaplanmasının gerçekleştirilmesi [64].....	46
Şekil 6.8. Alev püskürtme yönteminin torna tezgahında uygulanması [65].	47
Şekil 6.9. Alev püskürtme tabakası [6].	49
Şekil 6.10. Tel malzemeler için alev spreyleme sistemi [66].....	50
Şekil 6.11. Plazma püskürtme prosesinin şematik görünümü [63].	51
Şekil 6.12. Elektrik ark püskürtme sisteminin şematik görünüşü [2].....	53
Şekil 6.13. HVOF spreyleme tabancasının enine kesitinin şematik görünüşü [68].	55
Şekil 6.14. Patlamalı püskürtme işlemi ile termal spreyleme kaplama [72].	56
Şekil 7.1. Toz malzemeler için Alev spreyleme yöntemi [6].....	58
Şekil 7.2. Toz püskürtülecek yüzeye tornada diş açarak tutuculuk kazandırma [6]	60

Şekil 8.1. Bir tribolojik sistemin DIN 50320 normuna göre şematik gösterimi [19].....	65
Şekil 8.2. Aşınma zaman ilişkisi [81].....	69
Şekil 8.3. Adezyon aşınması [82, 83].....	70
Şekil 8.4. Abrasiv Aşınma Mekanizmaları [19].....	71
Şekil 8.5. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi [19].	72
Şekil 8.6. Aşınma deney türlerinin şematik resimleri [19].....	74
Şekil 9.1. Metco 350 NS malzemesinin SEM görüntüsü [85].....	78
Şekil 9.2. Metco 101 SF malzemesinin mikron yapıdaki alınmış SEM görüntüsü [86].	78
Şekil 9.3. Deneylerde kullanılan atritör (öğütme) cihazı.....	80
Şekil 9.4. SEM ve altın kaplama cihazı.....	80
Şekil 9.5. Kumlanmış AISI 1045 malzemeleri ve kumlama cihazı	82
Şekil 9.6. Alevle püskürtme tekniği ile gerçekleştirilen kaplama uygulamaları	83
Şekil 9.7. Deney numunesinin ölçüleri.....	83
Şekil 9.8. Yüzey pürüzlülük ölçme cihazı (Mitutoyo SJ-201)	84
Şekil 9.9. Deney numunelerini bakalite alma cihazı	85
Şekil 9.10. Deneylerde kullanılan pnömatik tip aşınma cihazının elemanları	87
Şekil 10.1. Mekanik Alaşımlanmış M350 NS ve M101 SF tozlarının 5000 ölçekli SEM görüntüleri	89
Şekil 10.2. Mekanik Alaşımlanmış M350 NS ve M101 SF tozlarının 50000 ölçekli SEM görüntüleri	89
Şekil 10.3. Mekanik Alaşımlanmış M350 NS ve M101 SF tozlarının 75000 ölçekli SEM görüntüleri	90
Şekil 10.4. Mekanik Alaşımlanmış M350 NS ve M101 SF tozlarının 75000 ölçekli SEM görüntülerinden alınan Boyut Ölçümü-1.....	90
Şekil 10.5. Mekanik Alaşımlanmış M350 NS ve M101 SF tozlarının 75000 ölçekli SEM görüntülerinden alınan Boyut Ölçümü-2.....	91
Şekil 10.6. Mekanik Alaşımlanmış M350 NS ve M101 SF tozlarının 75000 ölçekli SEM görüntülerinden alınan Boyut Ölçümü-3.....	91
Şekil 10.7. Mekanik Alaşımlanmış M350 NS ve M101 SF tozlarının 30000 ölçekli SEM görüntülerinden alınan bölgesel EDX analizleri	92
Şekil 10.8. M.A. 30000 ölçekli SEM görüntüsünden 1 numaralı bölgenin EDX verileri..	92
Şekil 10.9. M.A. 30000 ölçekli SEM görüntüsünden 2 numaralı bölgenin EDX verileri..	93

Şekil 10.10. M.A. 30000 ölçekli SEM görüntüsünden 3 numaralı bölgenin EDX verileri	93
Şekil 10.11. M.A. toz numunesinden alınan XRD görüntüsü	94
Şekil 10.12. TR-1 Numunesinin optik mikroskop fotoğrafları	97
Şekil 10.13. TR-2 numunesinin optik mikroskop fotoğrafları	98
Şekil 10.14. TR-3 numunesinin optik mikroskop fotoğrafları	99
Şekil 10.15. TR-4 numunesinin optik mikroskop fotoğrafları	100
Şekil 10.16. TR-5 numunesinin optik mikroskop fotoğrafları	101
Şekil 10.17. TR-1 Numunesinin mikro sertlik değerleri	102
Şekil 10.18. TR-2 Numunesinin mikro sertlik değerleri	103
Şekil 10.19. TR-3 Numunesinin mikro sertlik değerleri	103
Şekil 10.20. TR-4 Numunesinin mikro sertlik değerleri	103
Şekil 10.21. TR-5 Numunesinin mikro sertlik değerleri	104
Şekil 10.22. Kaplamalı numunelerin karşılaştırmalı mikro sertlik değerleri	104
Şekil 10.23. 2 Kg'lık yüke bağlı numunelerin aşınma miktarlarının kayma mesafesi ile değişiminin karşılaştırılması	106
Şekil 10.24. 4 Kg'lık yüke bağlı numunelerin aşınma miktarlarının kayma mesafesi ile değişiminin karşılaştırılması	106
Şekil 10.25. 6 Kg'lık yüke bağlı numunelerin aşınma miktarlarının kayma mesafesi ile değişiminin karşılaştırılması	107
Şekil 10.26. Kaplamasız AISI 1045 numunelerin aşınma miktarlarının yük ve kayma mesafesine bağlı değişimin karşılaştırılması.....	107
Şekil 10.27. Takviyesiz kaplamalı numunelerin aşınma miktarlarının yük ve kayma mesafesine bağlı değişimin karşılaştırılması.....	108
Şekil 10.28. %5 Takviye kaplamalı numunelerin aşınma miktarlarının yük ve kayma mesafesine bağlı değişimin karşılaştırılması.....	108
Şekil 10.29. %10 Takviye kaplamalı numunelerin aşınma miktarlarının yük ve kayma mesafesine bağlı değişimin karşılaştırılması.....	109
Şekil 10.30. %15 Takviye kaplamalı numunelerin aşınma miktarlarının yük ve kayma mesafesine bağlı değişimin karşılaştırılması.....	109
Şekil 10.31. Deney numunelerinin yüke bağlı genel değişimi	110
Şekil 10.32. Deney yüklerine bağlı olarak aşınma numunelerinin sürtünme katsayılarının değişimi	111

Şekil 10.33. %10 Takviyeli değişken yüklerde sürtünme katsayısının yola bağlı değişimi	112
Şekil 10.34. AISI 1045 Numunesinin 2 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri	113
Şekil 10.35. AISI 1045 Numunesinin 4 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri	113
Şekil 10.36. AISI 1045 Numunesinin 6 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri	113
Şekil 10.37. Takviyesiz kaplama numunesinin 2 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri	114
Şekil 10.38. Takviyesiz kaplama numunesinin 4 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri	115
Şekil 10.39. Takviyesiz kaplama numunesinin 6 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri	116
Şekil 10.40. %5 Takviyeli kaplama numunesinin 2 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri	117
Şekil 10.41. %5 Takviyeli kaplama numunesinin 4 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri	118
Şekil 10.42. %5 Takviyeli kaplama numunesinin 6 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri	119
Şekil 10.43. %10 Takviyeli kaplama numunesinin 2 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri.....	120
Şekil 10.44. %10 Takviyeli kaplama numunesinin 4 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri.....	121
Şekil 10.45. %10 Takviyeli kaplama numunesinin 6 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri.....	122
Şekil 10.46. %15 Takviyeli kaplama numunesinin 2 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri.....	123
Şekil 10.47. %15 Takviyeli kaplama numunesinin 4 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri.....	124
Şekil 10.48. %15 Takviyeli kaplama numunesinin 6 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri.....	125

TABLolar LİSTESİ

Tablo 7.1. Yüzey Hazırlama Yöntemlerinin Başlıca Kullanım Yerleri [6].	61
Tablo 9.1. Metco 350 NS Tozunun Kimyasal Kompozisyonu [85].	77
Tablo 9.2. Metco 101 SF tozunun Kimyasal Kompozisyonu [86].	77
Tablo 9.3. AISI 1045 Malzemesinin Kimyasal Kompozisyonu.	79
Tablo 9.4 Deney Numunelerinin Adlandırılması	81
Tablo 9.5. Deney Numunelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Değerleri	85
Tablo 10.1. Al ₂ O ₃ XRD Hesaplama ve Kristal Boyutu Değerleri	95
Tablo 10.2. Fe ₃ Mo XRD Hesaplama ve Kristal Boyutu Değerleri	95

KISALTMALAR

YMK	:Yüzey Merkezli Kübik
İKK	:İşlem Kontrol Kimyasalı
HVSFS	:Yüksek Hızlı Alev Püskürtme
M.A.	:Mekanik Alaşım
SA	:Süper Alaşım
XRD	:X-Ray Diffraction
PVD	:Fiziksel Buhar Biriktirme
CVD	:Kimyasal Buhar Biriktirme
HR _C	:Rocwell C Sertliği
HV	:Vickers Sertlik Değeri
AISI	:Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
ASTM	:American Society for Testing and Materials
EDS	:Elektron Dağılımlı Spektrometre
GSMH	:Gayri Safi Milli Hasıla
HVAF	:Yüksek Hızlı Hava Yakıtı
D-gun	:Patlamalı Püskürtme
TM	:Türk Malı
EDX	:Enerji Dağılımlı X-ray Analizi
DIN	:Alman Endüstri Normu
GTA	:Gaz Tungsten Ark Kaynağı
VPS	:Düşük Basıncılı Vakum Plazma Püskürtme
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu
HVOF	:Yüksek Hızlı Oksijen Yakıt Püskürtme Tekniği

SEMBOLLER LİSTESİ

$^{\circ}\text{C}$	: Sıcaklık
Ra	: Yüzey Pürüzlülüğü
Ni	: Nikel
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Al	: Alüminyum
H	: Hidrojen
Cr	: Krom
Ti	: Titanyum
Fe	: Demir
γ	: Ostenit Fazı
γ'	: İntermetalik Fazlar
ΔG	: Ağırlık kaybı (gr)
W_r	: Aşınma direnci (Nm/ mm ³)
n	: İş parçasının dakikadaki dönme sayısı (dev/dk)
d_k	: Kaplanacak malzeme çapı (mm)
μ_k	: Sürtünme katsayısı
W_a	: Aşınma oranı (mm ³ /Nm)
F_N	: Yükleme Ağırlığı
s	: Aşınma yolu (m)
ρ	: Yoğunluk (gr/cm ³)
B	: XRD' de oluşan pikin yarı yükseklikteki genişliği
t	: Kristal boyutu (nm)
θ	: Malzemenin XRD deki sapma açısı
λ_c	: Cihazın Bakır tüp ışın dalga boyu
V	: Aşınma hızı (m/s)

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve buna bağlı endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan makine parçalarının, niteliği yüksek kalitede malzemeler olması istenmektedir. Bu sebeple gelişen süreç içerisinde malzemelerin özelliklerini iyileştirme veya alternatif yeni ürünler ortaya koyma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Teknolojik sürecin ilerlemesi ile birlikte malzemelerde, işe uygunluk başta olmak üzere niteliklerinin de ihtiyacı karşılayacak durumda olması istenmektedir.

Bu nitelikleri özetlediğimizde; ekonomiklik, fiziksel açıdan düzgünlük, yüksek sıcaklıklarda yapısal özelliklerini koruma, fiziksel ve mekanik karakteristik özelliklerinin uygunluğu malzeme seçiminde belirleyici rol oynamaktadır. Bu nedenle günümüzde pek çok yöntem geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Özellikle havacılık, uzay, gaz türbinleri, otomotiv ve denizcilik sektöründe yüksek performanslı, hem hafif hem de dayanıklı, yüksek sıcaklıklarda kararlılık gibi özellikleri bünyesinde birleştirebilen malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaçları karşılayabilmek için pratik ve deneysel amaçlı birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya da devam edilmektedir [1].

Katı cisimlerin yüzeylerinden sürekli malzeme kaybı şeklinde kendini gösteren ve yüzeyin bozulmasına neden olan aşınma, çeşitli makine parçalarının ömürlerini ve performanslarını azaltan bir olaydır. Mekanik hareket yapan makine parçalarının yüzeylerinin, aşınmaya karşı özellikle dayanıklı olması istenmektedir [2]. Aşınma ve korozyondan dolayı her yıl dünyada önemli malzeme kayıpları oluşmaktadır. Ülkelerin korozyon nedeniyle kayıpları gayrisafi milli hasıllarının %3,5-5 i arasında değişmektedir. 1998 yılında yapılan korozyon aşınması maliyet araştırması raporlarına göre ABD' de direkt korozyon aşınmasından kaynaklı maliyet kaybının 276 Milyar Dolar / Yıl olarak bulunduğu ve bu rakamın da ABD'nin GSMH' nin %3.1 oranına eş değer olarak çıktığı belirlenmiştir. Öyle ki yalnız Türkiye' deki 1991 yılı kaybının 4,5 milyar dolar olduğu tahmin edilmektedir [3]. Bu kayıpları bertaraf etmek için aşınmayı en aza indirmede uygun yağlama, malzeme ve tasarım seçimi yapılmalıdır [4, 5].

Birçok endüstriyel uygulamalarda, özellikle yüksek statik ve dinamik yüklere maruz kalan makine parçalarının, bu yüklere dayanıklı olmasının yanında, özel çevre şartlarından da etkilenmemesi gerekir. Ancak her yönden bu çalışma koşullarına dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi çok masraflı olmakta ve parçaların oldukça pahalı malzemelerden imal edilmesi gerekmektedir. Ağır çevre şartlarında çalışacak gerekli dayanıklılığa sahip ana metalleri, bu şartların zararlı etkilerinden korumak için çok daha ucuz bir yöntem olan, dayanıklı ana metalin yüzeyini çevre şartlarından etkilenmeyen özelliğe sahip malzemelerle kaplama teknolojisi geliştirilmiş ve kısaca “yüzey kaplama teknolojisi” olarak isimlendirilmiştir. Burada kaplanan yüzeyler genellikle metal olmakla beraber, nadir durumlarda bazı metal olmayan yüzeylerin kaplanması da mümkündür. Nispeten ucuz olan ve asıl yükü taşıyan ana malzemeler, uygun kaplama malzemeleri ile kaplanarak aşınmaya, korozyona ve ısıya dayanıklı hale getirilebilir [6].

Tribolojik uygulamalar için, yüzey mühendisliğinin kullanılmasında iki amaç vardır. Bunlardan birisi, yüzey malzemesinin aşınma direncini arttırmak, diğeri ise yüzey malzemesinin sürtünme davranışını iyileştirmektir. Yüzeyin kimyasal bileşimi yada mikro yapı değişimi sağlanarak istenilen mekanik özellikler sağlanabilir [2, 7].

Bu çalışmada, mevcut literatür dikkate alınarak AISI 1045 çeliğinin yüzeyi mekanik alaşımlandırılmış tozlar ile kaplanmıştır. Deneylerde ilk önce %10 oranında Metco 350 NS ile %90 oranında Metco 101 SF bir karışım oluşturulmuştur. Daha sonra bu karışım, 60 saatlik öğütme işlemine tabi tutularak mekanik alaşımlandırılması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu alaşım tozları, herhangi bir işleme tabi tutulmamış direkt olarak hazır alınan Metco 350 NS tozlarının içerisine %5, %10, %15 takviye oranlarında karıştırılarak elde edilen yeni karışımlarla AISI 1045 malzemelerinin yüzeyi toz alev püskürtme tekniği ile kaplanmıştır. Bu şekilde oluşturulan deney numunelerinin kaplama türlerine bağlı olarak aşınma, sertlik ve mikro yapı gibi özellikleri incelenmiş ve dünya bilimine katkıları sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Bu bölümde tez çalışması ile yakın ilişkili olan çalışmaların literatürdeki konumları incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda kullanılan tozlardan öğütme işlemine, öğütme işlemlerinden termal kaplama uygulamalarına ve buradan da malzemenin aşınma davranışları, mikro yapı, mikro sertlik gibi mekanik özelliklerine varan süreç içerisindeki tüm ilişkili çalışmalar araştırılmıştır.

Yapılan çalışmalardan da anlaşıldığı üzere, yüzeye farklı bir malzemedan ilave bir kaplamanın yapıldığı termal püskürtme yöntemi, endüstrinin her geçen gün ilgisini çekmektedir. Metallerden ve oksitlerden, oksit seramik ve camsı metallere kadar geniş bir dağılım aralığındaki malzemeleri içeren termal püskürtme kaplamaları, ana malzemenin beklenilmeyen ve gereksiz olan hasarından dolayı başta üreticiler olmak üzere herkesin odak noktası haline gelmiştir. Bu sayede parçayı tamamen yenilemek için gerekli olan masrafın az bir kısmı ile ve çeşitli termal püskürtme yöntemleri ile uygulanan yeni yüzey malzemesi, bu tür parçalara ilave servis ömrü kazandırmaktadır [8].

Voyer' e göre (2010), toz alev püskürtme işleminin, demir esaslı kaplamaların aşınma uygulamaları için kullanılabilirliğine yönelik uygunluğu, az miktarda gaz tüketimi ve düşük ekipman maliyetinden dolayı diğer termal püskürtme tekniklerine kıyasla en etkili yöntemlerden biri olduğu ve bu tip yöntemle ile üretilen kaplamaların mikro yapıları incelendiğinde yüzey kalitesinin ve sertlik değerlerinin düşük olduğu belirtilmiştir. Fakat aşınma dayanımlarının ise bir HVOF ve Plazma tekniği ile kaplanmış yüzeyler kadar birebir benzerlik taşıdığını da ifade etmiştir [9].

Kılınç (1999), tarafından yapılan çalışmada demir esaslı süper alaşımın Mekanik Alaşımlama (M.A.) metoduyla üç farklı hızda 5 farklı mekanik alaşımlama değirmeninde üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numunelerin çeşitli düzeylerde mikro sertlik dağılımları, optik ve elektron mikroskobu ile incelenerek gerekli analizler yapılmıştır. Ayrıca belirli (M.A. + homojenleşme + oksitleme) işlemlerden geçen bu malzemelerin ilerde çekme, yorulma ve benzeri mekanik özelliklerinin araştırılması ayrıca nano boyutlu

malzeme üretimine uygunluğunun araştırılması gerektiği hakkında önerilerde bulunulmuştur [10].

Sarı ve arkadaşları (1999), alevle püskürtme yöntemini kullanarak AISI 1050 malzemesinin Ni esaslı kaplamaların abrasiv erozif aşınma direncine ve WC ilavesinin kaplama yüzeyindeki etkisini araştırmışlardır. Alev püskürtme ile kaplama tabakası oluşturulmuş numunelerin tamamı AISI 1050 çeliğine göre daha yüksek aşınma dayanımı gösterdiğini yaptıkları deneysel çalışmalarla saptamışlardır [11].

Wang ve arkadaşları (2000), plazma püskürtme tekniği ile nano yapılı Al_2O_3/TiO_2 tozlar kullanılarak kaplama tabakasını elde edip, bu kaplama tabakasının abrasiv aşınma dayanımındaki etkisini araştırmışlardır. Nano yapılı Al_2O_3/TiO_2 tozları kullanılarak gerçekleştirilen kaplamaların yüksek abrasiv aşınma dayanımı, işlem görmemiş yani mikro boyutlu Al_2O_3/TiO_2 tozları ile gerçekleştirilen kaplamalara göre 4 kat daha dayanıklı olduğu ifade edilmiştir. Al_2O_3/TiO_2 kaplamaları hem aşınma testi öncesi hem de sonrasında Optik, SEM ve XRD analizleri yapılarak kaplama ve abrasiv aşınma mekanizmasını aydınlatmaya çalışmışlardır [12].

Eigen ve arkadaşları (2005), yüksek enerjili öğütücüde nano yapılı sermet tozlarını elde ederek, termal püskürtme teknikleri (VPS ve HVOF) ile kaplamalarını gerçekleştirmişlerdir. Ardından işlem görmüş olan nano yapılı kaplamalar ile hiç işlem görmemiş olan mikro yapılı kaplamaların mikro yapıları analiz edilerek karşılaştırılmıştır. VPS ve HVOF püskürtmelerde nano yapılı sermet malzemelerin benzer mikro yapılar oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca nano yapılı kaplamaların mikro yapılı kaplamalara göre sert faz varlığının daha düşük olmasına rağmen aşınmaya karşı en iyi davranışı sergilediğini de saptamışlardır. Ek olarak nano yapılı tozlarla gerçekleştirilen kaplamaların potansiyelinin değerlendirilmesi için hafif aşınma testlerine odaklanılması hakkında fikirlerini ileri sürmüşlerdir [13].

Ji ve arkadaşları (2005), nano ve mikro yapılı FeAl tozları ile elde ettikleri kaplama tabakalarının kalınlıkları arasında bir araştırma yapmışlardır. Öğütülmüş olan nano yapılı FeAl tozlarının HVOF tekniği kullanılarak 5 mm kalınlığında bir kaplama tabakasını başarılı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca mikro yapılı aynı tozlarla HVOF tekniği

kullanılarak 300 mikron, Plazma tekniği kullanılarak ta 5 mm kalınlıklarında kaplama tabakaları elde edilerek, kaplama tabakalarındaki mikro yapı ve sertliklerinin oluşumundaki deney şartlarını test etmişlerdir. APS tekniğiyle gerçekleştirilen mikro yapılı kaplamaların sertlikleri, HVOF tekniğiyle üretilen nano yapılı kaplamalara göre %30 daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, uzun süreli HVOF işleminin nano yapılı kaplama tabakalarının kalınlığının oluşumunda püskürtme için uygun bir yöntem olduğunu ortaya koymuşlardır [14].

Cherigui ve arkadaşları (2005), demir esaslı mikro ve nano yapılı tozların HVOF tekniğiyle püskürtülmesini deneysel olarak çalışarak kaplamanın magnetik ve yapısal olarak özelliklerini incelemişlerdir. Nano kristal tozlar kullanılarak püskürtülen FeSi kaplamaların, XRD görüntülerinde kristal boyutunun mikro kristalli tozlardan oluşturulan kaplamalara göre daha küçük boyutlarda olduğu görülmüştür. Kaplama sonrası mikro yapılı kaplamaların analiz raporlarına göre kaplama ile ana yüzey arasında oluşmayan porozite ve çatlaklıkların, kaplama ile ana yüzey arasındaki iyi adhezyona yani yapışarak birleşmesine bağlanılmıştır. Nano yapılı tozlarla oluşturulan kaplamalarda ise porozite oranın çok daha düşük olduğu ifade edilmiştir. Öğütücüde kristal boyutunun azaltılmasından dolayı elde edilen tozların mikro yapısında önemli değışikliklerden biri de atomik seviyelerdeki gerilmelerin artış gösterdiği belirtilmiştir [15].

Sidhu ve arkadaşları (2006), eriyik tuz ortamında bazı nikel esaslı süper alaşımların oksidasyon davranışları ile NiCrBSi kaplı nikel ve demir esaslı süper alaşımların HVOF püskürtme tekniği ile karakterizasyonu değerlendirmişlerdir. Kaplamaları mikro yapı, mikro sertlik, porozite ve kaplama kalınlığı ile ilişkili olarak karakterize etmişlerdir [16].

Basak ve arkadaşları (2006), termal püskürtme tekniği ile nano yapılı FeCu/WC–Co kaplı malzemenin korozyon ve korozyon-aşınma davranışı arasındaki ilişkisi, Hank’ in çözüm metodu yardımı ile nano yapılı WC–Co kaplamalar ile AISI 304 paslanmaz çeliği arasındaki durumları mukayese ederek incelemişlerdir. Korozyon testi başladığında kaplamalı yüzeylerde, AISI 304 paslanmaz çeliğe nazaran kademeli olarak yüzeylerden kopmaların meydana geldiği görülmüştür. Nano yapılı kaplamaların açık kısımlarından itibaren FeCu fazının WC-Co fazına göre zarar görmediğini ifade etmişleridir. Nano yapılı

kaplamaların koruyucu film oluşturma özelliği korozyona ve korozyon aşınmasına karşı etkili olduğunu belirtmişlerdir [17].

Galvanetto ve arkadaşları (2006), VPS tekniği ile karbon çelikleri üzerine (AISI 1040) gerçekleştirilen demir esaslı bor kaplamaların aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Aşınma testleri block-on-ring aşındırma sisteminde adhesiv yöntem ile gerçekleştirmişlerdir. Hava ve yağ olmaksızın gerçekleştirilen bu deney de 40 ve 60 N' luk yükler sırasıyla 0.8 ve 1.6 m/s hızlarda uygulanmıştır. Fe₂B kaplı numunelerde, kaplama hatasından dolayı aşınmanın oksidatif etkiye maruz kaldığını deneysel sonuçlarla ifade etmişlerdir [18].

Ulutan' nın çalışmasında (2007), yüksek mukavemetli düşük alaşımlı AISI 4140 çeliğine, üç farklı yüzey işlemi uygulanarak, mikro yapıda oluşacak değişimlerin malzemenin sertliğine ve aşınma davranışları üzerine etkilerini incelemiştir. Mikro yapı incelemelerinde optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve noktasal analiz teknikleri (EDS, EDX) ile birlikte X-ışını difraksiyonu (XRD) tekniklerinden yararlanmıştır. Yapılan deneyler neticesinde yüksek mikro sertlik ve buna paralel aşınma direnci yüksek kaplamalar elde etmiştir [19].

Çöğür' ün çalışmasında (2007), toz alev püskürtme yöntemi kullanılarak kaplanan farklı malzemelerin (Al5754 ve Ç1030) aşınma davranışları incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, kaplama sertliğinin altlık malzemesine göre değişkenlik göstermediği ve en yüksek kaplama sertliğinin krom-nikel esaslı tozlarla gerçekleştirdiğini belirtmiştir. En yüksek kaplama sertliğini belirlediği toz kaplamalarında, en yüksek aşınma dayanımının da yine aynı tozlarla oluşturulan kaplamalarda olduğunu saptamıştır. Ayrıca bu teknik ile ağır malzemeler yerine, hafif ve aşınma dayanımı yüksek malzemelerin elde edilebileceğini de ifade etmiştir [20].

Mahesh ve arkadaşları (2008), HVOF püskürtme tekniğini kullanarak nikel ve demir esaslı süper alaşım olan sırasıyla; süperni 76, süperni 750 ve süperfer 800' ün yani üç süper alaşımlı yüzeye Ni-5Al ile kaplamalarını oluşturup 900°C ortam şartları altında 100 devir uygulama ile oksidasyon deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Her devir sonunda yapılan ağırlık ölçümlerine göre süperni 750 alaşımının süperni 76 ve süperfer 800 alaşımlarına

göre ağırlık artışının yüksek olduğunu görmüşlerdir. Kaplamalı üç süper alaşım arasında demir esaslı süper alaşım olan süperfer 800 alaşım yüzeyinin en iyi oksidasyon direncine sahip olduğunu saptamışlardır [21].

Kamal ve arkadaşları (2008), demir ve nikel esaslı süper alaşım olan superni 75, superni 718 ve superfer 800 H altlık malzemelerine Cr_3C_2 -NiCr' un patlamalı tabanca püskürtme tekniği kullanılarak kaplanmasının sıcak korozyona olan direncini incelenmişlerdir. Yapmış oldukları kaplamalı yüzeylerin mikro yapılarının incelenmesi sonucu nerdeyse yok denecek kadar az olan %0.8 den daha az bir porozite oranına sahip olduğunu görmüşlerdir. Süper alaşımların üzerindeki patlamalı püskürtme yöntemi ile Cr_3C_2 -NiCr kaplamaların korozyon ürünleri, korozyon mekanizmalarına açıklık getirmesi sebebiyle kompozisyon özellikleri ve kendi mikro yapısını ortaya çıkarmak için XRD, SEM, ve EDAX yöntemleri kullanılarak analizlerini yapmışlardır. Özellikle superfer 800H' ın üzerindeki kaplama tabakasının superni 75 ve superni 718' e göre karşılaştırıldığında daha iyi bir sıcak korozyona karşı koruma gösterdiğini saptamışlardır [22].

Bradai ve arkadaşları (2008), alev püskürtme tekniğini kullanarak gerçekleştirdikleri metalik kaplamaların mikro sertlik, faz ve mikro yapı gibi özelliklerini incelemişlerdir. Kaplamanın yapılacağı altlık malzeme parçası olarak aşınmış krank milini seçmişlerdir. Kaplama tabakasının etkili olabilmesi için (100Cr6/Molibden) kompozit malzemesini kullanmışlardır. Yapılan kaplamaların aşınma dayanımına katkıda bulunmasının yanı sıra yüksek mikro sertliklere de (428 HV 0.2) sahip olduğunu ortaya koymuşlardır [23].

Eroğlu yapmış olduğu çalışmada (2008), 2014-T4 kalitedeki bir alüminyum alaşımlı altlık malzemesinin yüzeyini plazma püskürtme tekniği uygulayarak alüminyum matrisli SiC takviyeli kompozit ile kaplayarak aşınma direncine etkisini araştırmıştır. Yapılan çalışmada, takviye oranı arttıkça sertliğin de buna paralel olarak arttığını ve aşınma direncinin de altlık malzemeye oranla çok daha iyi olduğunu belirtmiştir [24].

Minisker' in çalışmasında (2009), nikel esaslı tozlar ile HVOF termal püskürtme tekniğinden yararlanarak oluşturulan kaplamaların mekanik özelliklerini incelemiştir. Oluşturulan kaplamalarda püskürtme mesafesinin sertlik değişiminde etkili olduğunu yani

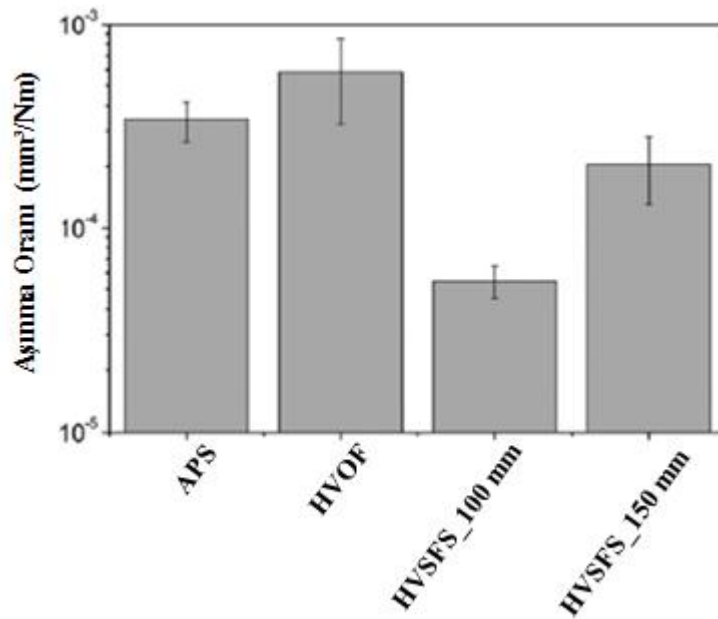
püskürtme mesafesi arttıkça sertliğin de arttığı ve bununla oksitlenmenin artışına bağlı olduğunu belirtmiştir [25].

Sharma ve arkadaşları (2009), alev püskürtme tekniğiyle gerçekleştirilen Ni esaslı kaplamalara La_2O_3 katkısının kaplamanın mikro yapı, sertlik ve aşınma davranışlarına olan etkisini araştırmışlardır. Kaplamaların aşınma dayanımı, sertliğinin geliştirilmesi ve tanecik boyutunun incelenmesi için optimum La_2O_3 katkısının ağırlıkça (%1.2) olduğunu saptamışlardır. Optimum katkı oranının kaplamanın sertliğini % 22 oranında artırırken, aşınma oranını ise katkılı ve katkısız kaplama göre % 25 oranında düşürdüğünü ve bunu da kaplama tabakasının sertliğindeki artışa ve taneciklerinin küçültülmesine bağlamışlardır [26].

Kai ve arkadaşları (2009), klasik ve nano yapılı NiCrC tozlarının HVOF püskürtme tekniği ile yapmış oldukları kaplama numunelerinin oksidasyon ve sıcak korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Araştırmalarının sonuçlarından da anlaşıldığı üzere, her iki kaplama türünün de yüksek korozyon direncine sahip olduğu, özellikle nano yapılı NiCrC kaplamaların korozyon direncinin diğerine göre ön planda olduğunu tespit etmişlerdir. Nano yapılı kaplamalarda gelişmiş tane sınırı difüzyonu sayesinde sadece yüksek oranda CrO_3 yoğunluğunun oluşumuna katkı sağlamayıp aynı zamanda metal ile CrO_3 tabakası arasındaki Cr' un tükenmesini azaltmaya da yardımcı olmaktadır. Böylece, nano yapılı kaplamaların düşük porozite oranı göstermesinden dolayı anti korozyon özellikleri için yararlı olacağını da belirtmişlerdir [27].

Wu ve arkadaşları (2009), HVOF tekniğini kullanarak altlık malzemesi paslanmaz çelik olan malzeme yüzeyine demir esaslı kaplama tabakasını gerçekleştirip, bu kaplama tabakasının mikro yapı ve mikro sertliklerini incelemişlerdir. Kaplamaya yakın alt tabakanın, kumlanmış alt tabaka, yarı ergimiş veya ergimiş partiküllerin oluşturduğu ilk etki bölgesinden elde edilen sertlik ölçümlerine göre yüksek mikro sertlik değerine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Kaplamanın yüksek sertliği, güçlü bir katı dağılımın çözünmesi ve ayrıca tane sınırının güçlendirilmesi gibi bir çok etkilere dayandırılmıştır [28].

Rauch ve arkadaşları (2009), nano partiküllü tek fazlı oksit içerikli üç farklı malzemeyi yüksek hız donanımlı alev püskürtme tekniğini kullanarak kaplama uygulamalarını gerçekleştirmişlerdir. Kaplamaların kuru sürtünme şartları altında aşınma dayanımı, elastik modülü ve sertlik gibi mikro yapısal özellikleri belirlenerek karakterize edilmiştir. Benzer şartlar altında HVOF ve APS tekniği ile de yapılan Al_2O_3 kaplamalar arasında karşılaştırma yapılarak karakterize etmeye çalışmışlardır. Aşınma testlerinde HVSFS ile yapılan kaplamaların HVOF ve APS tekniği ile üretilen kaplamalara göre biraz daha iyi aşınma oranlarına sahip olduğunu belirlemişlerdir (Şekil 2.1) [29].

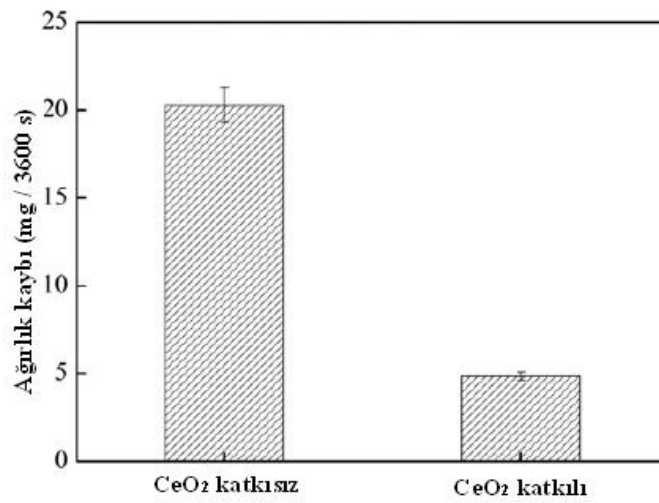


Şekil 2.1. Al_2O_3 tozlarının farklı kaplama teknikleri ve kaplama mesafelerine göre aşınma oranlarının değişimi [29].

Bolelli ve arkadaşları (2010), Al_2O_3 kaplamaların üretilmesinde HVSFS tekniği kullanılarak mikron ve nano boyutlu tozların aşınma davranışındaki etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları kaplama tabakalarının hepsinde, aşınma testinin başlanmasından sonra ortaya tribolojik katmanların oluşumu başlamaktadır. Nano boyutlu tozlarla oluşturulan kaplama tabakalarının mikron boyutlu tozlarla üretilen kaplamalara göre çok daha dayanıksız ve gözenekliliğinin fazla olduğu, tribolojik tabakaların yaygın bir

şekilde yer aldığı ve buna bağlı olarak da çok daha fazla aşınma oranına sahip olduğu görülmüştür [30].

Hou ve Wang (2010), demir esaslı kaplama alaşımının aşınma dayanımı ve mikro yapısı üzerine CeO₂ katkısının Rietveld geliştirme yöntemi ile etkisini incelemişlerdir. Mikro yapının değişimi, faz kompozisyonları ve yoğunluğu içindeki değişime göre CeO₂ katkılı demir esaslı kaplama alaşımının aşınma dayanımını artırması için uygulanabilir olduğu belirtilmiştir (Şekil2.2) [31].



Şekil 2.2. CeO₂ katkılı ve katkısız demir esaslı alaşım kaplamaların aşınma dayanımlarının mukayese edilmesi [31].

Li ve arkadaşı (2010), soğuk sprey metodu ile nano yapılı demir esaslı bir alaşımın kaplamasını gerçekleştirmişlerdir. Kaplama tabakasını oluşturan öğütülmemiş tozlarının tanecik boyutlarını, XRD cihazı ile belirlemişlerdir. Kaplama tabasını oluşturacak olan tozların nano yapıda olabilmesi için 40 saatlik bir mekanik öğütme süresinden sonra, partikül boyutlarının 11 nm boyutlarında olduğunu belirlemişlerdir. Mekanik alaşımlanmış olan tozların ana yüzey ile oluşturduğu tabaka da %8 oranında oksijen varlığını saptamışlardır. Kaplama tabakasının mikro sertliği yaklaşık olarak 400 HV olarak ölçülmüştür. Ek olarak Fe-Si alaşım tozlarının mıknatıslanma özelliğinin, öğütülmemiş haldeki Fe-Si tozlarına göre 3-4 kat daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Böylece yüksek

iletkenliğe sahip olan nano yapılı Fe-Si alaşımasının manyetik özellikli malzemeler sınıfında kullanılmak için, ümit verici olabileceğini ifade etmişlerdir [32].

Senderowski ve arkadaşları (2010), D-gun püskürtme tekniğiyle yapmış oldukları çalışmada, ortalama 100 mikron kalınlığındaki Fe-Al intermetalik kaplamaların sade karbonlu çelik (AISI 1045) yüzeyine kaplaması yapılarak, kaplamanın mikro yapı analizini gerçekleştirmişlerdir. Kaplama ile altlık malzeme yüzeyi arasındaki yapışma, gaz parlamasıyla birlikte sıcak akış içerisindeki alüminyumca zengin oksitlenme sürecinden kaynaklı olarak şekilsiz Al_2O_3 tiplerinin oluşturduğu katmanların kaplama damlacıkları çevresinde yer aldığını tespit etmişlerdir. Ana yüzeye bitişik yani sınır olan bölgelerde, değişkenli olarak kristal sütun şeklinde FeAl ve Fe_2Al_5 intermetalik fazlarına rastlamışlardır. FeAl ve Fe_3Al fazlarının ergimemiş toz partikülleri gibi çok sayıda kusurun katı bölgeye dönüşümüyle giderilmiştir. Bu dönüşümlerin, kuvvetli basınç etkisi altında olduğu görülmüştür. Öyle ki kaplamalardaki artık gerilmelerin genellikle sıkışan basınçtan kaynaklı olarak ifade edilmiştir [33].

Lampke ve arkadaşları (2011), termal püskürtme uygulamaları için nano kristal takviyeli demir esaslı kompozit alaşımların aşınmaya karşı dayanıklılığını araştırmışlardır. Bu araştırmanın ilk hedefi, yeni üretilecek olan termal püskürtme malzemesinin ekonomik olarak çekici özelliğini ortaya çıkarmalarıdır. HVOF işlemi ile mikro yapıdaki partiküller ile yapılan kaplamaların kaplama tabakaları 1000 HV0.3 serliğinden daha büyük değerlerde ve düşük porozite oranına sahip olduğunu belirlemişlerdir. Yeni geliştirilen kaplamaların yüksek abrazyon aşınma dayanımı ASTM G75-01 testi ile değerlendirilmiş ve sert krom kaplamalara alternatif olarak kağıt endüstrisinde örnek bir uygulama teşvik etmesi bakımından umut verici olduğunu ifade etmişlerdir [34].

Zhuang ve arkadaşları (2011), önceden hazırlamış oldukları Mo-FeB-Fe sermet tozları ile alev püskürtme tekniğini kullanarak Q235 çeliğinin yüzey kaplamasını elde edip, mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Seramik kaplama ile ana yüzey arasındaki aşınma dayanımının, ana malzemeye kıyasla yaklaşık 5.28 kat daha iyi olduğunu yaptıkları deneyler ve analiz sonuçlarıyla saptamışlardır [35].

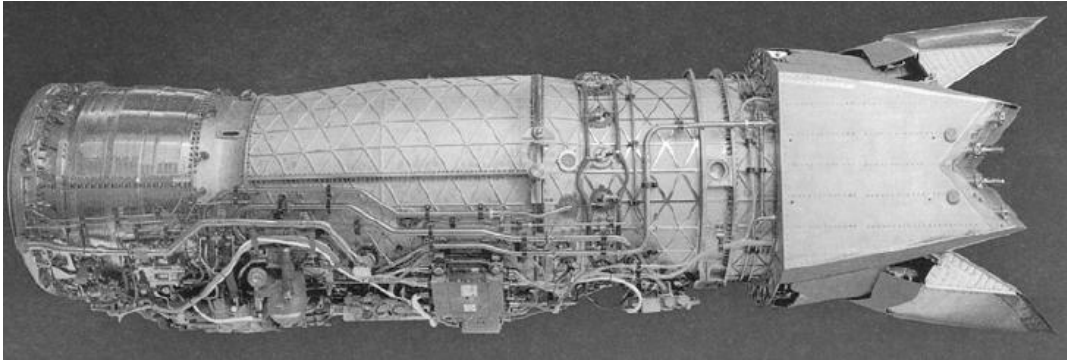
3. SÜPER ALAŞIMLAR

Süper Alaşımlar, Ni, Co, Cr, Nb, Mg ve/veya Fe elementlerinden en az bir tanesince yüzde olarak zengin olup, değişen çevre ve yüksek sıcaklık koşullarında, yüksek gerilme altında yapısal kararlılık gösterir. Bu malzemeler, katı çözelti matrisi içerisinde ince dağılmış formda, değişik karbürler ve intermetalik fazlar içerirler. Bunlar, 1000-1200°C arasında kullanılabilmelerine karşın 13000°C’ de de kısa süreli kullanılabilirler. Alaşımda en iyi kullanım sıcaklığı, ergime sıcaklığının %80’i ve daha aşağı sıcaklıklardır [36]. Süper alaşımlar kesin olarak bir sınır yaratılması güç olan bir malzeme grubunu oluşturmaktadır. Buna rağmen genel itibarıyla kabul gören bir tanıma göre süper alaşımlar genellikle VIII B elementlerinin oluşturduğu yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilen diğer uygulamalara kıyasla daha şiddetli mekanik gerilmelerin altında ve yüksek yüzey kararlılığının gerekli olduğu uygulamalarda kullanılan alaşımlardır [37]. Süper alaşım, yüksek sıcaklıklarda yüksek performans gerektiren uçak türbin motorlarında ve turbo şarjlarda kullanım için geliştirilmiş ve II. Dünya savaşından kısa bir süre sonra kullanılmıştır [38]. Bugün kullanılan süper alaşımların temeli, % 80 nikel ile % 20 krom alaşım olan ve 50 yıldan beri elektrikte direnç teli olarak kullanılan malzemelerden esinlenerek geliştirilmiştir. Süper alaşım, ilk olarak 1940’lar da dikkate değer oksidasyon dayanımı ile sürünme ve kırılma geriliminden ötürü düşük miktarda titanyum ve alüminyum katılarak kullanılmaya başlanmıştır [39]. İlk üretilen süper alaşım, Nimonic 80’dir [40].



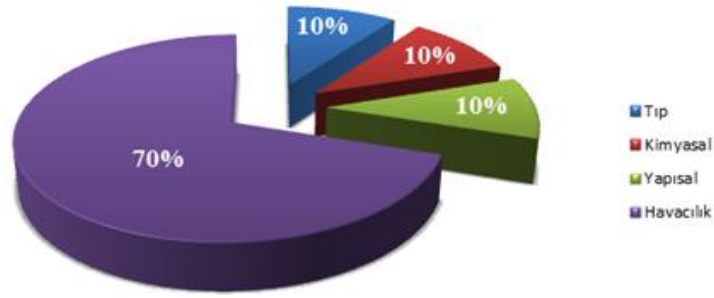
Şekil 3.1. Inconel MA 754’den yapılmış bazı gaz türbini parçaları [41].

Süper alaşımlar; genellikle demir, nikel, kobalt ve daha az miktarlarda tungsten, molibden, tantal, niyobyum, titanyum ve alüminyum alaşımlarla yapılan çeşitli formülleri içerirler. Süper alaşımların en önemli özellikleri; 650°C' nin üstündeki sıcaklıklara uzun süre dayanmaları ve sıcaklığa bağlı korozyon ve erozyona dayanıklılıklarıdır. Nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda (1500-1650°C) yüksek dayanıma sahiptirler. Bundan dolayı süper alaşımlar bir çok alaşım çeşidinin yerine geçmiştir [42].



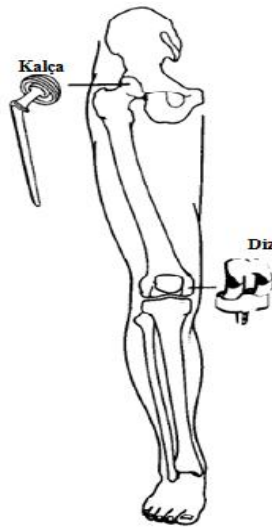
Şekil 3.2. F119 Gaz türbini motoru - süper alaşımların kullanıldığı bir sistem [43].

Yüksek ergime noktasına sahip ısı dayanımlı alaşımlar uçak motorlarının parçalarının üretiminde kullanılan temel malzemelerdir. Bu alaşımlar nikel esaslı alaşımlar, kobalt esaslı alaşımlar, demir esaslı alaşımlar ve titanyum alaşımları olmak üzere dört ana grupta incelenebilirler. Şekil 3.2' de süper alaşım tüketiminin 2/3'ünün havacılık endüstrisinde jet motorlarının ve ilgili parçaların üretiminde kullanıldığını göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda yüksek mekanik ve kimyasal özellikleri süper alaşımları jet motorlarında yüksek sıcaklıklarda çalışan sabit ve hareketli parçaların üretimi için eşsiz kılmaktadır. Bazı süper alaşımlardan üretilmiş parçalar çeliklerden üretilmiş parçalara kıyasla daha küçük ve hafif olmaktadır. Bu, yakıt tüketiminde ve hava kirliliğinde önemli derecede bir azalma anlamına gelmektedir. Bir motorun ağırlığındaki her bir kilogramlık azalma motorun kullanım ömrü boyunca 150.000 \$'tutarında bir tasarruf anlamına gelmektedir [44].



Şekil 3.3. Kullanım alanlarına göre süper alaşım tüketim oranları [40].

Süper alaşım üretiminin kalan 1/3'ü denizaltı, endüstriyel ve taşıtların gaz türbinlerinde kullanılmakla beraber uzay mekiklerinde, roket motorlarında, nükleer reaktörlerde, denizaltılarda, buhar güç istasyonlarında, petrokimya donanımlarında ve tıp sektöründe kullanılmaktadır [37, 44]. %10 luk bölümünü oluşturan tıp alanı için de özellikle toz metalürjisi tekniği kullanılarak bir çok implant ürünleri oluşturulabilmektedir. İmplant malzemelerinin en yoğun olarak kullanıldığı bölge olan kalça bölgesi iyi bir mekanik özelliğe sahip malzemelerin sağlanabilmesi için alaşımlı tozlardan imal edilmektedir. Şekil 3.4 de kalça ve diz bağlantı yerlerinde, protez bağlantı bölgelerinin en yaygın olan kısımlarını oluşturmaktadır. Bu tip implant bölgeler ASTM F 799 kompozisyon içeriğine dayalı olarak kobalt, krom ve molibden esaslı alaşımlardan üretilmektedir [43].



Şekil 3.4. Kobalt esaslı süper alaşımlı üretilen implant bölgeleri [43].

3.1. Süper Alaşımların Metalürjisi

Süper alaşımlar, yüzey dengesinin gerektiği ve yüksek gerilmelerin olduğu 650°C ve üstü sıcaklıklarda kullanılmaktadır. Süper alaşım ifadesi; demir, nikel, kobalt ve krom kombinasyonları veya demir, nikel ve kobalt esaslı malzeme alaşımları için kullanılabilir. Bu alaşımlar daha düşük miktarlarda tungsten, molibden, tantal, niyobyum ve alüminyum olmak üzere çeşitli demir, nikel, kobalt ve krom oluşumları içerirler [40].

Nikel esaslı süper alaşımlar, sürünme-kırılma ömrünü arttırmak için küçük miktarlarda bor, zirkonyum ve hafniyum içerebilir. Karbon bütün alaşımlarda, genellikle nikel ve demir esaslı süper alaşımlarda yaklaşık % 0,03' e kadar bulunur. Fakat karbür safhasının kuvvetlendirilmesine neden olmak için kobalt esaslı alaşımlarda daha yüksek miktarlarda bulunabilir. Çeşitli süper alaşım tipleri arasında demir esaslı krom ve nikel içeren, demir-nikel-krom-kobalt bileşikleri, katı solüsyon takviyeli kobalt esaslı alaşımlar, kobalt esaslı karbür takviyeli alaşımlar, nikel esaslı 8 çöktürme takviyeli alaşımlar ve nikel esaslı oksit dağılım takviyeli alaşımlar bulunmaktadır [42].

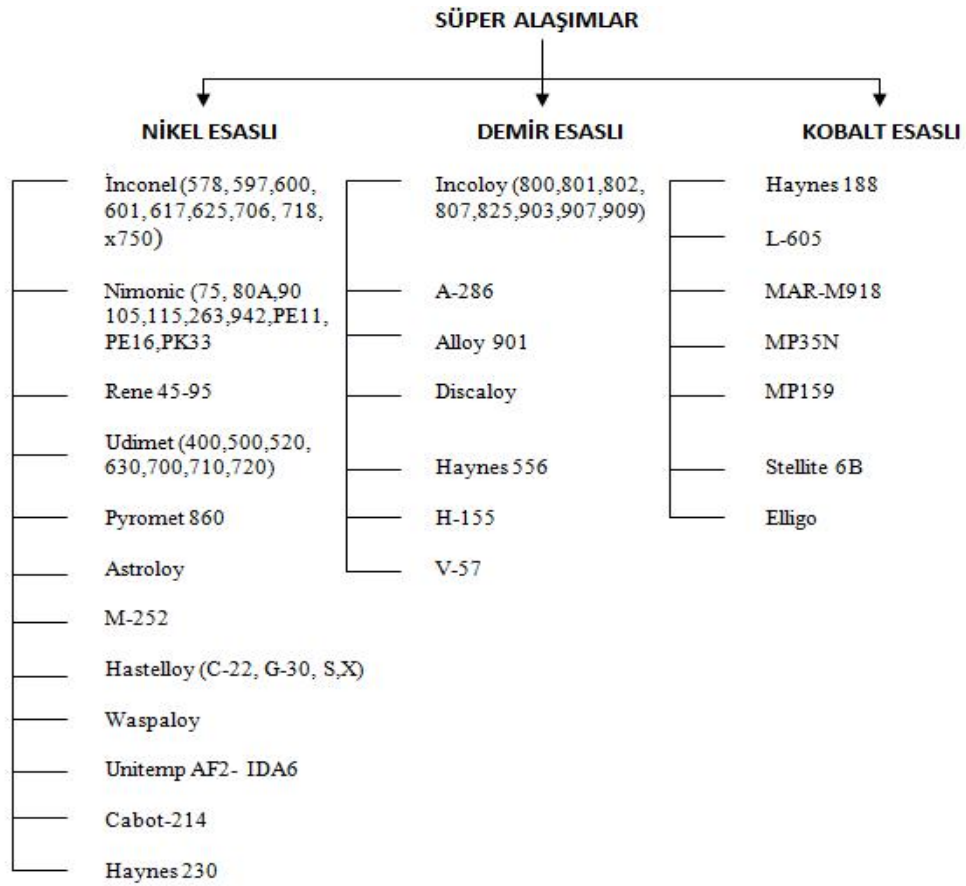
Bazı örneklerde, demir-nikel oranları, alaşımların nikel esaslı olarak adlandırılmasını gerektirmektedir. Bunun örnekleri % 16 Fe ve % 49 Ni içeren katı solüsyon katkılı Hastelloy X ve % 28 Fe ve % 52 Ni katkılı γ' takviyeli Inconel 718'dir. Bu iki örnekte, alaşımlar bir alaşım katkısı olarak demir içeren nikel esaslı süper alaşımlar olarak sınıflandırılmışlardır. Bu tip diğer alaşımlar tam olarak tanımlanmamıştır. Örneğin γ' takviyeli Incoloy 901 süper alaşımı % 42 Ni ve % 36 Fe içerir. Bu alaşım nikel esaslı olarak değerlendirilebilir veya demir-nikel-krom kategorisine sokulabilir. Bir karma bileşik katı solüsyon takviyeli alaşıma örnek olarak % 21 Cr, % 20 Ni, % 20 Co, % 32,5 Fe, % 3 Mo, % 2,5 W ve % 1 Nb içeren Multimet verilebilir. Bu sınıfın diğer bir karmaşık alaşımı ise Incoloy 903' dür. Bu alaşım, yüksek dayanım yanında, düşük sabit termal genleşme katsayısı ile istenilen yerlerde kullanılmaktadır [38].

3.2. Süper Alaşımların Sınıflandırılması

Süper alaşımlar, genel olarak aşağıdaki ana başlıklar altında ele alınabilir;

- 1) Nikel esaslı süper alaşımlar
- 2) Kobalt esaslı süper alaşımlar
- 3) Demir esaslı süper alaşımlar
- 4) Alüminyum esaslı süper alaşımlar
- 5) Magnezyum esaslı süper alaşımlar

Ayrıca bunların dışında büyük bir alt grup olarak, gösterdiği özellikler nikel esaslı süper alaşımlara benzeyen ancak ağırlıklı olarak demir içeren, Ni-Fe süper alaşımlar ayrı bir grup olarak da sayılabilir [45].



Şekil 3.5. Süper alaşımların sınıflandırılması [42].

3.2.1. Kobalt Esaslı Süper Alaşımlar

Kobalt esaslı süper alaşımlar, temel bileşen olarak kobalt ve önemli miktarlarda krom tungsten ve daha az miktarlarda molibden, niyobyum, tantal, titanyum ve duruma göre demir içeren alaşımlardır. Katı solüsyon ve karbür safhaları ile kuvvetlendirilmişlerdir [42].

Kobalt esaslı süper alaşımlar, endüstriyel ve uçak türbinlerinde gerilme kırılma parametreleri, mükemmel korozyon ve oksitlenme direnci gibi özellikleriyle kullanılmaktadır [46].

Yaygın olarak gaz türbinli motorların sıcaklığa maruz kalan kısımlarında, nükleer reaktör parçalarında ve soğuk çalışma şartlarında kullanılabilen kobalt esaslı bir (Haynes 25) alaşımdır. Haynes 188 ise özellikle gaz türbinlerindeki yaprak tabaka halindeki parçalar için tasarlanmış lantan, silikon, alüminyum ve manganez içeriklerini kontrol edebilen basit oluşumu ile 110 °C' ye kadar olan sıcaklıklarda oksidasyon dayanımı olarak mükemmel kalite sunar. MP-35N ve MP-159 alaşımları ise, özellikle sertleştirilmiş olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştır ve her iki alaşım da, zor çalışma şartlarında yüksek dayanıma sahiptir [42].

3.2.2. Demir Esaslı Süper Alaşımlar

Bileşenler içinde, demir oranı en fazla olan ve sertlik artışının oksitler, karbürler veya intermetalik çökeltilelerle sağlandığı alaşımlar demir esaslı süper alaşımlar olarak adlandırılabilir. Bu alaşımlar, oksidasyon, karbürizasyon, sıcak korozyona karşı mükemmel direncin yansırı yüksek sıcaklık mukavemeti ve oksit dağılımı sayesinde elde edilen kararlı mukavemet yapısı gibi özellikler nedeniyle gaz türbinlerinin yanma odalarında, nükleer atık boşaltma elemanlarında ve cam direnç ısıtıcılar gibi sıcaklığa maruz kalan alanlarda yaygınca kullanılmaktadır [45].

Demir esaslı alaşımların en önemli sınıfı Yüzey Merkezli Kübik (YMK) matrisi içinde intermetalik bileşiklerin çökmesi sonucu sertleştirilmiş alaşımlardan oluşmaktadır. En

genel çökelti A-286, V-57 ve Pyromet 860 alaşımlarında bulunan γ' çökeltisidir. Diğer taraftan demir içeren alaşım Inconel 718 (genellikle nikel esaslı alaşımlar grubunda gösterilir ve % 18,5 demir içerir) γ'' fazları tarafından sertleştirilir. Tungsten ve molibdenyum katı çözelti sertleşmesini sağlamak için ilave edilebilir. Hastelloy X (genel olarak nikel esaslı alaşım olarak kabul edilir fakat %10 demir içerir) üçüncü grup alaşımlara örnek olarak gösterilebilir. Bu alaşımlarda katı çözelti sertleşmesi geçerlidir, fakat alaşım soğuk işlendiğinde yada yaşlandırıldığında sertleşme karbürlerin çökmesiyle elde edilebilir. İntermetalik bileşikler ile sertleştirilmiş olan demir esaslı alaşımlar gaz türbin motorlarında bıçak, disk gibi parçalarda kullanılmaktadır. Örneğin, bazı gaz türbin motorlarında A-286 alaşımı türbin diskleri ve Incoloy 901 alaşımı türbin hareket merkezi olarak kullanılmaktadır [47].

3.2.3. Alüminyum Esaslı Süper Alaşımlar

Alüminyum esaslı süper alaşımların düşük yoğunluğu, yüksek mukavemeti ve korozyona karşı direnç gösterme özelliklerinin olması bu alaşımları hafifliğin ön plana çıktığı uzay ve havacılık sanayinde kullanımını sağlamıştır. Mekanik alaşımlama sırasında katılan işlem kontrol elemanlarının çözünmesiyle yapıda alüminyum karbürler oluşur. Oluşan bu oksit ve karbür parçacıklar yaklaşık 30-50 nm boyutunda olup, sonraki işlemler sonucu oluşacak ultra ince tane boyutunu kararlı hale getirerek mukavemetin % 50 artmasını sağlar. Bu artış, yorulma çatlak ilerlemesine ve gerilmeli korozyon hasarına karşı direnci artırmasının yanında kırılma tokluğunu da yükseltir [48].

3.2.4. Magnezyum Esaslı Süper Alaşımlar

Mekanik alaşımlama tekniğinin magnezyum esaslı süper alaşımlara uygulanması, ısı ve hidrojen gazı elde etmenin yanında metal hidridlerin de üretimini sağlamıştır. Deniz suyu gibi bir elektrolitle hızlı reaksiyona giren, kısa devreli galvanik hücreler şeklindeki süper oksitlenen magnezyum alaşımlar ısı ve hidrojen gaz üretirler. Buda dalgıçlar için ısı kaynağı ve hidrojen motorlarında yakıt olarak kullanılır. Ayrıca, mekanik alaşımlanmış Mg

ve Fe tozlar su ile temas sonucunda ısı üreterek hazır yemek ısıtıcısı olarak kullanılırlar [48].

Magnezyumun yüksek buhar basıncına sahip olması ve iki metalin ergime noktalarının geniş bir aralıkta olması itibariyle, magnezyum esaslı alaşımların hidrojen depolayan malzemeler olarak kullanılmasını sağlamıştır [48].

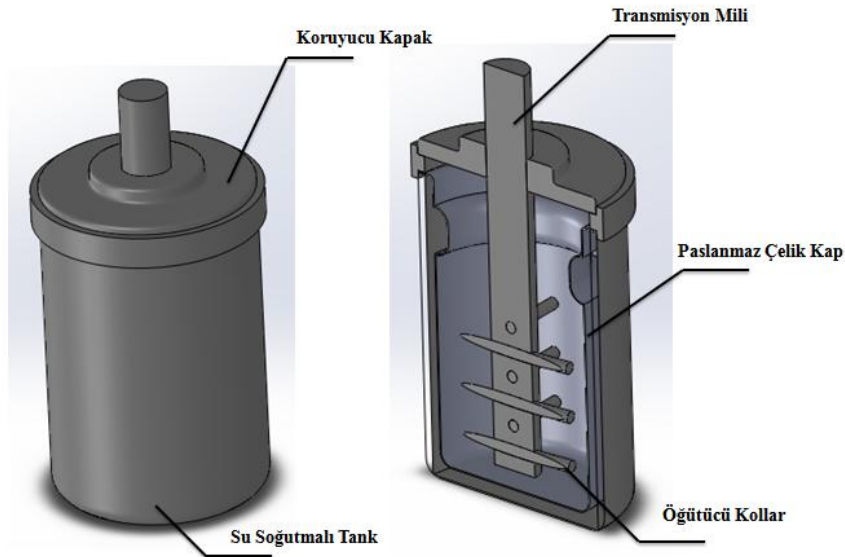
3.2.5. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar

Toz metalürjisi tekniği ile üretilip, gaz türbinlerinin sıcak kesimlerinde kullanılan nikel esaslı süper alaşımların gelişimi 1970’li yıllarda metalürji mühendisliğinin önemli buluşlarından birisidir. O zamana kadar işlenmesi hemen hemen mümkün olmayan yüksek mukavemet özellikli, nikel esaslı süper alaşımların ani katılaştırma ve sabit sıcaklıkta metal şekillendirme tekniklerinin beraber uygulanmasıyla kolayca dövülebildiği o yıllarda keşfedilmiştir. Bu buluş toz metalürjisi tekniğiyle üretilmiş, yüksek performanslı uçak motorlarında kullanılan yüksek mukavemetli disklerin imalatında çığır açmıştır. Türk Malı (TM) süper alaşım teknolojisi şimdiye kadar mükemmel bir gelişim göstermiş ve SA tozlardan imal edilen parçalar hem askeri, hem de sivil maksatlı uçak türbinlerinde kullanılmıştır. Ni esaslı süper alaşımlar kimyasal bileşim olarak en karmaşık süper alaşımlardır. Bunların gelişimi fiziksel metalürjinin gelişimine paralel olarak artmaktadır. Genelde %30-75 Ni ve %30’a kadar Cr ihtiva ederler. Ni ile Cr’ un bir arada bulunması yüksek korozyon dayanımı sağlar. 650-1100°C sıcaklıklar arasında kullanılan malzemeler içinde yapı özellikleri ilişkisi en iyi bilinen malzemelerdir. İleri teknoloji hava taşıt motorlarının %50’sini nikel esaslı süper alaşımlar oluşturmaktadır. Matris, yüzey merkezli kübik (YMK) ostenit (γ) yapıdadır [48].

4. MEKANİK ALAŞIMLAMA

Mekanik Alaşımlama (M.A.), yüksek enerjili değirmen kullanılarak homojen dağılımlı oksit içeren metal toz üretim yöntemidir [10]. Bir başka açıdan ifadesiyle, homojen dağılıma sahip ve oldukça ince tozlardan oluşmakta olup genellikle bir katı hal reaksiyonu şeklinde gerçekleşen yüksek enerjili öğütme işlemidir. Mekanik Alaşımlama tekniği ile son derece ince ve homojen mikro yapıların üretilmesini mümkün kılan toz malzemelerin inert bir ortamda yoğun öğütme işlemiyle sürekli olarak kırılma ve soğuk kaynaklanmaya hemen ardından yeniden kırılma ile yeniden kaynamaya maruz bırakılan düşük sıcaklıkta yapılan alaşım sentezleme yöntemidir [48].

Mekanik Alaşımlamada üretilmesi istenilen metal tozları Şekil 4.1’de görüldüğü gibi yüksek enerjili atritör içine birlikte konulur. Bu tozlardan en az bir tanesinin bağlayıcı olması bakımından yumuşak olmalı, diğeri ise sert oksit parçacıkları olmalıdır [10].



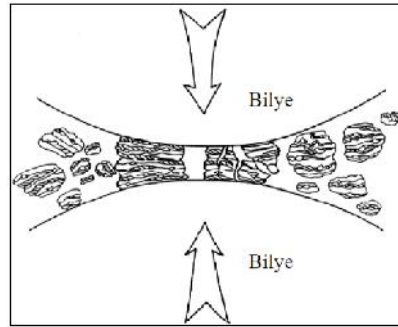
Şekil 4.1. Yüksek enerjili atritörün 3D şematik görünümü [49].

Bir başka ifadeyle mekanik alaşımlama, tozların paslanmaz çelik kazanlarda sertleştirilmiş çelik bilyeler veya tungsten bilyeler ile istenilen sürelerde öğütülerek ve karıştırılarak yapılan bir kat hal alaşımlama işlemidir [48].

Mekanik Alaşımlama işlemi, uygulanması düşünülen tozların hem kompozisyonu ve hem de mikro yapılarının istenilebilen şekilde değiştirilebildiği veya oluşturulabildiği esnek bir işlemdir [10].

Bilyalı öğütme, bir ufalama işlemi olarak kullanıldığında, parçacık boyutu kırılma yoluyla düşerken parçacık kimyası ise değişmemektedir. Mekanik Alaşımlama yöntemini, diğer bilyalı öğütme işlemlerinden ayıran en önemli özellik ise, parçacık kırılmasının sürekli formda sağlanması ve mekanik alaşımla boyunca parçacıkların kaynaklaşmasıdır.

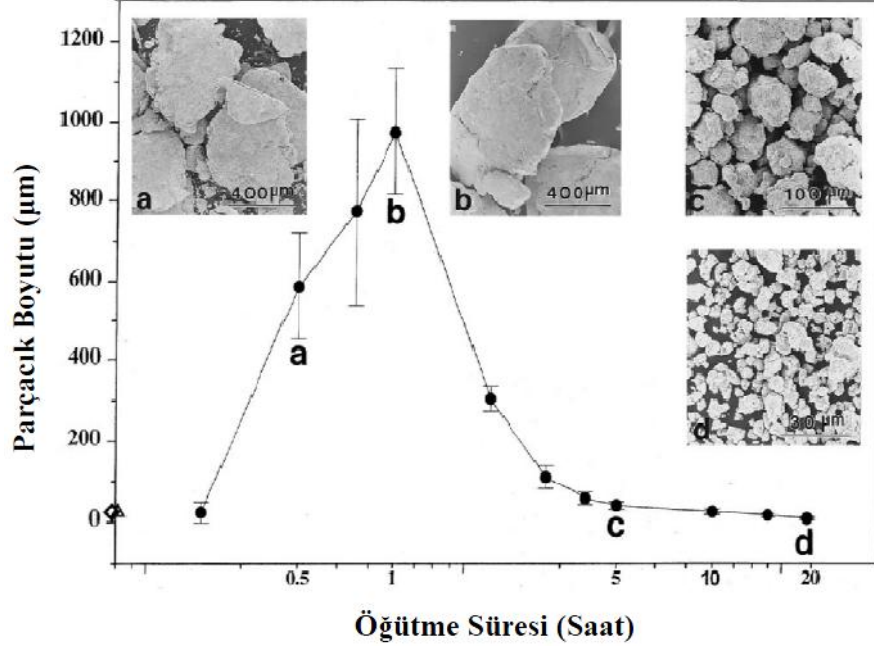
Sürekli bir formda gerçekleşen bilya - toz - bilya veya bilya - toz- kap çarpışmaları sırasında kırılan parçacıklar atomik olarak temiz yüzeyler yaratır. Mekanik alaşımlama soy bir ortamda yapıldığından kırılan bu yüzeyler oksitlenmezler ve böylece bu tür iki yüzey arasında çarpışmalar sırasında kaynaklaşma olur ve işlem sürecinde olmaya devam eder. [10].



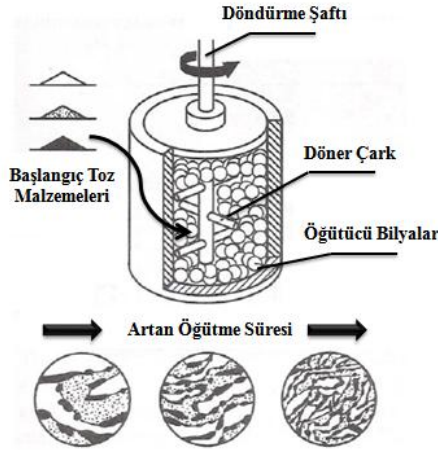
Şekil 4.2. Bilye-bilye çarpışması esnasında arada kalan toz parçacıklar [48].

Yüksek enerjili atritör çalıştırıldığında, bilyalar birbirine çarpar ve çarpmanın etkisi ile arada kalan tozlar ezilir ve böylece sert oksit partikülleri matris içine gömülür. Bu işlem

devam ettikçe tozlarda pekleşme, kırılma ve kaynaşma devam eder. Çok kısa sürede dahi karışım elde edilir, fakat çok homojen değildir [10].



Şekil 4.3. M.A. işlemi boyunca toz boyutunun öğütme süresine bağlı değişimi [48].



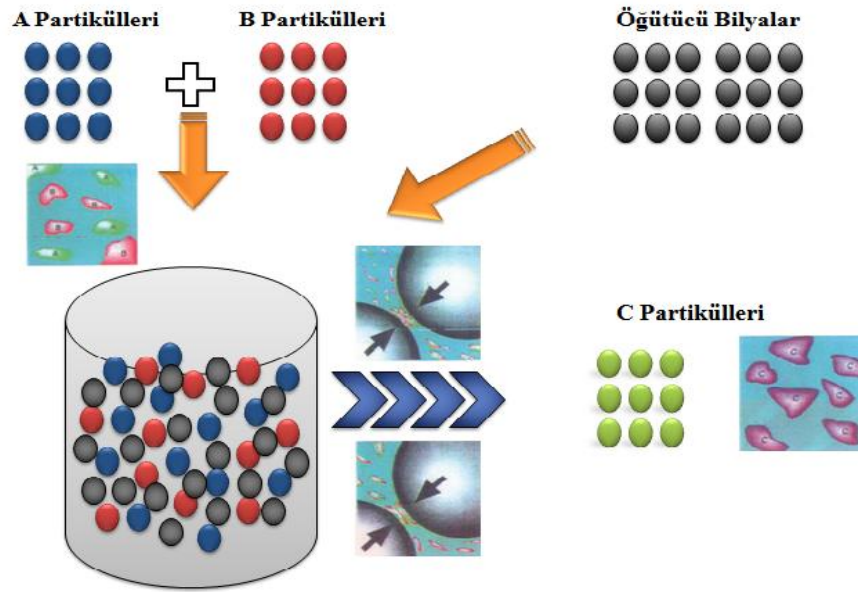
Şekil 4.4. Atritör cihazında tozların öğütme süresine bağlı şematik gösterimi [50].

Şekil 4.4 de atritör cihazında tozların öğütme süresine bağlı olarak mikroskobik boyutta meydana gelen homojenizasyon gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere

başlangıç tozları lamine hale gelerek pekiştirici faz ana matris fazı içerisinde homojen bir şekilde dağılmıştır [50].

Mekanik Alaşımlama sırasında gerçekleşen işlem, nitelik olarak bilinmektedir. Alaşımda kullanılan metal tozlarının sertlikleri karşılaştırıldığında, sertlikleri birbirine yakınsa katmanlı yapıya benzer bir yapı oluşur. Eğer alaşımlama çok farklı bir sertlikte tozlar ile yapılıyorsa, sertliği daha fazla olan tozlar parçalanır ve sert parçacıklar yumuşak parçacıklar arasına dağılır. Sert parçacıkların kırılması, mekanik alaşımlama işlemi devam ettikçe sürekli olur ve yapı gittikçe homojen bir hal alır. Eğer katmanlı yapı optik mikroskop ile daha fazla ayırt edilemiyorsa veya sertlik yüksek değerlere ulaşmışsa, alaşımlamanın tamamlandığı anlaşılır [10].

Mekanik Alaşımlamanın nicel açıklamaları daha yavaş ortaya çıkmaktadır. C alaşım partiküllerini oluşturmak için A ve B elementsel tozlarının alaşımlanmaları sırasında meydana gelen birleşme olayının şematik olarak görünümü Şekil 4.5 te verilmiştir.



Şekil 4.5. M.A. sırasında kaynaklaşmanın şematik gösterilişi [10].

4.1. Mekanik Alaşımlamada Mikroyapı

Mekanik Alaşımlamada oluşan mikroyapı, katılan tozların özelliklerine, şekline, boyutlarına, sünekliğine ve benzeri birçok özelliklerine bağlıdır. Sünek toz parçacıkları kullanımı durumunda öğütmenin erken safhalarında kompozit tabakalı bir yapı oluşur. Bu tabakalar başlangıç ögesinin çok çeşitli kombinasyonlarıdır. Bu işlem aşamalı olarak kompozit tabakaları arasındaki difüzyon yoluyla maruz kaldığı mekanik öğütme ile inceltir ve homojenleştirilir [10].

Günlerce devam eden bu karıştırma işlemi sonunda ise katmanlı yapı kaybolur ve homojen bir görünüm elde edilir. Çıplak gözle yapı homojen görülürken, elektron mikroskobu altında lamelli yapıyı tespit etmek mümkündür, ancak kimyasal homojensizliği tespit etmek oldukça zordur. Son olarak alaşımlanmış olan tozların kompozisyonu başlangıçtaki toz karışımı kompozisyonun aynısıdır ve gerçek alaşım üretilmiştir [10].

4.2. Mekanik Alaşımlamanın Uygulama Alanları

Mekanik alaşımlama, 1970'li yıllardan başlayarak önemli gelişmeler kaydeden bu üretim tekniği başlangıçta özellikle yüksek sıcaklıklarda yüksek performans göstermesi gereken parça imaline yönelik olarak ortaya çıkmıştır. Bu metot kompozit parça üretimindeki ergime ve katılaşmadan kaynaklanan problemleri ortadan kaldırarak, oksit parçacıklarının matris içerisinde homojen olarak dağılımını mümkün kılmaktadır. MA ile üretilen kompozit malzemeler içerisinde homojen olarak dağılmış oksit parçacıkları ile kontrollü ve dengeli mikro yapı malzemeye, ergime derecesine yakın bir sıcaklığa kadar önemli ölçüde mukavemet kazandırmaktadır [48].

M.A. metodunun önemi, ancak üretilmesi zor alaşımlar veya bilinen metotlar ile üretilmesi imkansız olan alaşımlar göz önüne alındığı zaman görülür. Basit karıştırma teknikleri yapıdaki oksitleri yeteri kadar homojen dağıtamamakta veya çok düzensiz bir

yapı oluşmaktadır. Uzay sanayi ve gaz türbünü gibi ortamlarda kullanılan alaşımların maksimum servis sıcaklığında çalışması istenir. Servis sıcaklığı arttığında, malzemenin mekanik ve oksitlenme dayanımlarının artırılması gerekir. Bu nedenle bu tür uygulamalar için MA ile elde edilen alaşım malzemeler istenir. M.A. işlemi, buna imkan vermekte ve bilinen diğer metotlarla üretim sırasında karşımıza çıkan problemlerin bir çoğu oluşmamaktadır [48].

M.A. esas olarak uzay sektörünün gelişmesiyle birlikte aranılan özellikte malzeme üretimi için geliştirilmiştir. Uzay sektöründe başarılı bir şekilde kullanılan ilk mekanik alaşımlama INCONEL alaşımı olarak bilinen MA 754 dür. Bu alaşım askeri jetlerin motorlarındaki sıcak bölgelerde kullanılmaktadır. Metallerin yüksek sıcaklık ortamında mukavemetlerini geliştirmek için alaşıma takviye malzeme ilavesi ilk olarak 1910 yılında tungsten ile thoryum ilavesi yapılarak sağlanmıştır. Mekanik Alaşımlama ile üretilen malzemelerde matris içersindeki parçacıklar arası mesafenin azalması sonucu malzemenin mukavemetinin arttığı gözlenmektedir [10].

4.3. Mekanik Alaşımlama Deney Parametreleri

Sağlıklı bir mekanik alaşımlama işleminin gerçekleştirilebilmesi için işlem üzerinde oldukça fazla etkileri olan pek çok parametrenin doğru bir şekilde seçilmiş olması gereklidir. Tozun içeriğini etkileyen en önemli parametrelerden bazıları şunlardır;

- Öğütücü tipi
- Öğütme tankı
- Öğütme hızı
- Öğütme zamanı
- Öğütme malzemesi (bilye)
- Bilye-toz ağırlık oranı
- Öğütme kabı doluluk miktar
- Öğütme sıcaklığı,
- İşlem kontrol kimyasalı

Bütün bu değişkenler birbirinden tamamen bağımsız değildirler bu nedenle doğru seğıilmiş parametreler, son ürün özellikleri üzerinde olumlu sonuçlar verecektir [48].

4.3.1. Öğütücü Tipi

Ticari ve laboratuvar amaçlı değişik kapasiteli öğütücü tipleri vardır. Öğütülecek toz miktar, öğütme süresini önemli ölçüde etkileyen öğütme enerjisi ve kirlenme oran gibi toz boyutunu ve özelliklerini etkileyen parametrelere bağlı olarak uygun bir öğütücü seğıilebilir [48].

4.3.2. Öğütme Tankı

Öğütücü bilyelerin öğütme tankının iç cidarına uyguladıkları darbeler nedeniyle kap malzemesinin bir kısmı yüzeyden koparak toza karışabilir. Bu nedenle M.A. işlemi sırasında öğütme kabı malzemesinin seğıimi önemlidir. Bu durum tozun kimyasal yapısının değişmesine veya parçacıkların kalktığı bölgelere öğütülen tozun yapışmasına neden olur. Buda, toz kaybına ve toz kirliliğine neden olur. Böyle durumlarda tozun kimyasal yapısının değişmemesi için uygun öğütme kabı seğıilerek gerekli önlemler alınmalıdır. Sertleştirilmiş kromlu çelik, sertleştirilmiş çelik, paslanmaz çelik, takım çeliği ve WC-Co gibi malzemeler öğütme kabı olarak kullanılır. Özel amaçlar için bazı özel malzemelerde kullanılmaktadır [48].

4.3.3. Öğütme Hızı

Öğütme hızı arttıkça toza aktarılan enerji miktarında da artış olacaktır. Öğütücü maddenin kinetik enerjisi ($E = \frac{1}{2} mv^2$) dir. Burada m, öğütücü madde miktar, v, öğütücü madde hızıdır. Bu nedenle tozlara sağlanan kinetik enerji, öğütme malzemesinin hızının artmasıyla artmaktadır. Ancak, öğütücü tipine bağlı olarak ulaşılabilecek maksimum hızda

sınırlamalar vardır. Örneğin geleneksel bir bilyeli öğütücüde dönme hız arttıkça bilyelerin hareket hızı da artar. Kritik bir hızın üzerinde, merkez kaç kuvvetinin etkisiyle öğütme kabının iç cidarlarına yapışır ve aşağıya düşmez. Böylece öğütme için gerekli olan darbe kuvveti meydana gelmez. Bu nedenle, kullanılan öğütme hız kritik değerin hemen altında olmalıdır. Bu sayede bilyeler maksimum yükseklikten düşerek darbe enerjisi üretmelidir [48].

Maksimum hız için diğer bir sınırlama da, öğütme kabı sıcaklığının yüksek bir değere ulaşma ihtimalidir. Bu durum bazen, tozların alaşımlanması ve/veya homejenizasyonu sağlamada gerekli olan difüzyon için avantaj olabilir. Ancak, bu artış genellikle dönüşüm işlemini hızlandırır ve sonuçta aşırı doymuş katı çözeltilerin yada öğütme esnasında oluşan kararsız fazların ayrışmasına sebep olduğu için dezavantaj olabilir. Ayrıca, meydana gelen yüksek sıcaklık, tozu kirletebilir. Buna ilave olarak, yüksek dönme hızlarında artan dinamik yeniden kristalleşme sebebiyle nano kristalli malzeme üretiminde ortalama kristal boyutunun arttığı ve kristallerde iç gerilmelerin azaldığı belirtilmiştir [48].

Artan öğütme hızının bir diğer dezavantajı da, öğütme malzemesinin ve öğütme kabının yüksek hızdan dolayı aşınmasıdır. Bu durum tozların kirlenmesine neden olur. Yüksek derecedeki plastik deformasyon tozların soğuk kaynaklanmasını artırır. Eğer bu nedenden dolayı öğütme kabının iç duvarlarına tozlar yapışırsa buda toz kaybına neden olur [48].

4.3.4. Öğütme Zamanı

Mekanik Alaşımlamalar da en önemli parametrelerden biride süredir. Normal şartlarda süre, toz parçacıkları arasındaki kırılma ve soğuk kaynaklaşma kararlı hale gelecek kadar seçilmelidir. Özellikle titanyum ve zirkonyum gibi reaktif elementlerin bulunduğu tozlar eğer gereğinden fazla öğütülürlerse, kirlenmeleri ve istenmeyen fazların oluşması kaçınılmaz olur. Bu nedenle tozlar sadece gerekli olan süre kadar öğütülmelidir. Toz parçacıklarının kararlı hale gelmesi için, yüksek enerjiyle kısa süreli ve düşük enerjiyle de

uzun süreli öğütme yapmak genel olarak kabul edilen bir kuraldır. Yani, yüksek bilye-toz oranında kısa süre, düşük bilye-toz oranında ise daha fazla süre kullanılmalıdır. M.A. için gerekli süre öğütme hızına, öğütücü tipine, öğütme yoğunluğuna, öğütme sıcaklığına ve bilye-toz ağırlık oranına bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu parametreler, her bir toz kombinasyonu için ayrı ayrı belirlenmelidir [48].

4.3.5. Öğütücü Madde

Sertleştirilmiş çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş kromlu çelik, paslanmaz çelik, WC Co ve rulman çeliği öğütücü madde olarak kullanılan en genel malzemelerdir. Öğütme kaplarında olduğu gibi öğütücü maddelerde özel amaçlar için değişik malzemelerden yapılmaktadır. Öğütücü maddenin yoğunluğu, toz üzerine yeterli darbe enerjisi oluşturabilecek büyüklükte olmalıdır. Bununla birlikte, öğütme haznesinde olduğu gibi, bilya malzemesi olarak ta bazı özel malzemeler kullanılır. Bunlar; bakır, titanyum, niobiyum, zirkon, yitrium oksit, safir ve silis nitriri gibi yer almaktadır. Bu sebeple öğütülen tozun, öğütücü kabına ve öğütücü maddeye yapışmaması için öğütücü kap ile öğütücü maddenin malzemesinin aynı olmasına dikkat edilmelidir [49].

Aynı zamanda öğütücü madde boyutu da öğütme verimini doğrudan etkiler. Genelde büyük boyutlu bilyeler toz parçacıklar üzerine daha fazla darbe enerjisi transfer eder. Ancak gereğinden büyük bilyeler toz boyutunun küçülmesini engelleyebilirler. Öğütücü madde boyutunun tozun final yapısı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu konuyla ilgili yapılmış bir çalışmada, titanyum alüminyum toz karışımı 5 ve 8 mm çapındaki bilyeler kullanılarak öğütüldüğünde amorf fazın oluştuğu 12 mm çapındaki bilyeler kullanıldığında ise amorf fazın oluşmadığı gözlemlenmiştir [48].

4.3.6. Toz-Bilye Ağırlık Oranı

Bilye-toz ağırlık oranı, bilye ağırlığının alaşımlanacak toza oranına denir. Bazı kaynaklarda bunu şarj oranı olarak isimlendirmiştir. Toz-bilye ağırlık oranı 1:1 gibi düşük bir değerden 1000:1 gibi yüksek bir değere kadar değişmektedir. 1000:1 yada 220:1 gibi çok yüksek değerdeki bilye-toz ağırlık oranı çok yaygın değildir. Her ne kadar, küçük kapasite de öğütülen tozlar 10:1 gibi bir oran da yaygın olarak öğütülseler de SPEX tipi yüksek enerjili bir öğütücü de bu oran genellikle 4:1 ile 30:1 arasında değişkenlik gösterir. Ancak öğütme atritör gibi büyük kapasiteli bir öğütücüde yapılıyorsa öğütücü hacmine bağlı olarak bu değer 50:1 ile 100:1 arasında değişiklik gösterir [48].

Öğütülen tozda belli bir faz elde etmek için gerekli zaman üzerinde bilye-toz oranının önemli bir etkisi vardır. Örneğin, bir SPEX öğütücüde yapılan çalışmada Ti ve %33 Al toz karışımında amorf faz, bilye-toz oran 10/1'de 7 saatte, 50/1'de 2 saatte, ve 100/1'de de 1 saatte oluştuğu tespit edilmiştir [49]. Benzer bir çalışmada %50 Al,%30 Si, %15 Fe ve %5 Ni toz karışımı için yapılmış ve burada 15/1 bilye-toz oranı kullanıldığında 40 saatlik bir öğütme sonunda amorf yap elde edilirken 10/1 bilye-toz oranı kullanılarak yapılan çalışmada benzer yapı 95 saat öğütme sonrası elde edilmiştir. Bilye-toz oranı 1/1 olan Fe-Al toz karışımı çelik ve WC bilyelerle öğütüldüğünde alaşımlamanın gerçekleşmediği tespit edilmiştir [48].

Bilye-toz oranı 8/1 oranında yapıldığında ise alaşımlama çelik bilyelerle 8 saatte gerçekleşirken WC bilyelerle 5 saatte gerçekleşmiştir. Çünkü yüksek bilye-toz oranından dolayı birim zamandaki çarpışma sayısı artar ve kullanılan öğütücü maddenin yüksek yoğunluğundan dolayı da meydana gelen darbe enerjisi artar. Sonuç olarak toz parçacıklarına daha fazla darbe enerjisi iletilir ve böylece M.A. için gerekli süre azalır [48].

4.3.7. Öğütme Kabı Doluluk Miktarı

Toz üretim hızı, öğütme kabının doluluk miktarına bağlıdır. Toz parçacıklarına etki eden darbe kuvveti, bilyelerin ve toz parçacıklarının öğütme kabı içinde serbestçe hareket edebilecekleri boş hacmine bağlı olarak değişmektedir. Yeterli miktarda alanın olması, toz parçacıklarına etki eden darbe kuvvetini artırır. Bu durumda toz parçacıklar arasındaki mekanik alışımı artırır. Fakat toz ve bilye miktar çok olursa bilyelerin hareket alanı kısıtlanır ve toz parçacıklarına etki eden darbe kuvveti azalır. Sonuçta toz parçacıklarının alışım hızını azaltır. Bu nedenle kabın %50'si boş bırakılmalıdır [49].

4.3.8. Öğütme Sıcaklığı

Öğütülen tozların yapısını belirlemede en önemli parametrelerden biri olarak ta öğütme sıcaklığının etkisidir. Alışım fazlarının yapısını difüzyon işlemi belirlemektedir. Böylece elde edilen son fazın, katı çözelti, intermetalik, nano yapı veya amorf faz olup olmadığına bakılmaksızın, öğütme sıcaklığının herhangi bir alışım sisteminde belirli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir [51].

M.A. esnasında meydana gelen sıcaklık artışının önemli iki kaynağı mevcuttur. Bunlardan biri, bilyelerin kinetik enerjileri nedeniyle meydana gelen bölgesel sıcaklık artışıdır. Bu bölgesel sıcaklık artışı yaklaşık olarak 10^{-5} s gibi kısa bir sürede gerçekleşir. Bu süre yaklaşık olarak iki bilyenin birbiriyle çarpışma süresi olarak da kabul edilebilir. Bu bölgesel sıcaklık artışını ölçmek çok zordur. Ancak bu sıcaklık artışı, toz parçacıklarının maruz kaldıkları plastik deformasyon oranını ve ısı transferinin etkisini de içeren uygun modellere bağlı olarak yalnızca teorik olarak hesap edilebilir. Sıcaklık artışı birkaç yüz derece olabilir. Sıcaklık artışının ikinci türü ise, öğütme kabının tamamının sıcaklığıdır. Bu da teorik olarak veya deneysel ölçümlerle tespit edilebilir. Deneysel ölçümlerin bir çoğu, kabın sıcaklığının 50-150 °C arasında değişiklik gösterdiğini tespit etmiştir [48].

Öğütme esnasındaki sıcaklık artışı, genellikle bilye-bilye, bilye-toz, bilye-cidar çarpışması ve aynı zamanda sürtünmeden dolayı meydana gelir. Öğütme esnasında tozların

tamamında meydana gelen sıcaklık artışının birkaç nedeni vardır: Birincisi, yukarda da bahsedildiği gibi öğütme malzemesinin kinetik enerjisinden dolayı tozlarda meydana gelen yoğun mekanik deformasyon tozların sıcaklığını artırır. Bu nedenle, en yüksek enerjide (öğütme hız, bilyelerin dönme hızları, öğütme zamanı, öğütücü bilyelerin çapı, bilye-toz ağırlık oranı v.b.) sıcaklık yükselmesi en fazladır [48].

İkincisi; öğütme işlemi esnasında meydana gelen ekzotermik işlemlerden kaynaklanır. Bu işlem, toz parçacıkların yanması ve bu yanmanın etkisiyle ortaya çıkan ilave ısıdan dolayıdır. Öğütme esnasındaki yanma, öğütme kabı sıcaklığının ölçülmesiyle tespit edilir. Öğütmenin ilk başlarında öğütme zamanı ile beraber düzenli olarak öğütme kabının sıcaklığı artar. Parçacıklar arasında yanma başladığında, toz partikülleri arasında ekzotermik bir reaksiyon oluşur bu da öğütme kabının sıcaklığını ani olarak artırır ve böylece sıcaklık artışı tespit edilmiş olur. Sıcaklık artışı difüzyon ve alaşımlama işlemlerinin hızını artırır. Ancak, tozlardaki oksitlenme, üretilmiş amorf fazların kristalizasyonu gibi bazı olayları da teşvik ettiği için bu bir dezavantajdır. Bu nedenle, sıcaklık artışı çeşitli yöntemlerle düşürülebilir. En pratik olan fanla soğutmadır. Bu yöntemle sıcaklık artışı etkili bir şekilde azaltılabilir. Bir diğer yaygın olan metot ise, tozlar belli bir süre öğütülür sonra sıcaklığın kabul edilebilir bir değere kadar düşmesi sağlanır ve öğütme işlemine yeniden başlanır. Öğütme kabının çevresinde soğutucu gaz yada sıvıların sirkülasyonu sağlanarak da sıcaklık artışı engellenebilir [48].

4.3.9. İşlem Kontrol Kimyasalı (İKK)

M.A. işlemi, deformasyona bağlı kaynaklanma ve kırılma şeklinde gerçekleşir. Özellikle sünek tozlar kaynaklanmaya ve sıvanmaya meyillidirler. Soğuk kaynaklanma eğilimini azaltmak için toz karışımı içine belli miktarda işlem kontrol kimyasalı ilave edilir. Bu kimyasallar katı, sıvı ve gaz halde olabilirler. Stearik asit, hegzan, metanol, çinko stearat, etanol vb. başlıca kullanılan kimyasallardır. İlave edilen kimyasallar genellikle kırılmayı hızlandırırken, yağ türevleri tozlar tarafından emilebilir [52].

Kullanılan işlem kontrol kimyasallarının toplam toz ağırlığına oranı %1-5 aralığındadır. Genelde ilave edilen miktar %1-2 kadardır. İlave edilen bu kimyasalların çoğu öğütme sırasında çözünerek, toz ile etkileşir ve bileşik oluşturur. Devam eden öğütle birlikte toz parçacıkları içerisinde safsızlıklar ve/veya dağılmış fazlar şeklinde bulunur. Bu nedenle hidrojen ve karbon ihtiva eden hidrokarbonlarda, karbon ve hidrojen ihtiva eden karbonhidratlarda, bu kimyasallar karbon ve/veya oksijen toz bileşiklerine nüfuz ederek matris içine homojen dağılımı olan, karbür ve oksitleri meydana getirir. Bu bileşikler alaşım sistemi için zararlı olmadıkları gibi dağılım mukavemetleşmesinden dolayı, malzemenin mukavemetini ve sertliğini arttırabilir. Hidrojen, gaz olarak sistemden uzaklaşır veya ısıtma yada sinterleme esnasında metal tozları tarafından absorbe edilir. Hidrojen gaz öncelikle yüzey aktif maddesi olarak görev yapar ve genellikle alaşımlama işlemine dahil olamaz. Fakat, titanyumca zengin alaşımlarda yapılan bazı çalışmalarda, amorf faz dönüşümlerinde bir katalizör etkisi sergilediği tespit edilmiştir [48].

Havanın, öğütme kabı içerisinde bulunması veya tozların çok düşük sıcaklıklarda öğütülmesi kaynaklaşmayı en aza indirmektedir. Neden olarak da düşük sıcaklıklarda toz parçacıklarının kırılganlığının artması olarak görülmüştür. Kullanılan işlem kontrol kimyasalının miktarı ve toz öğütme şekli, toz parçacıklarının boyutunu, şeklini ve saflığını belirlemektedir. Toplam toz ağırlığına oranları %0,5-4 olan iki farklı işlem kontrol kimyasalı (polietilen glikol ve stearik asit) kullanılarak yapılan çalışmada, planetary bilyeli öğütücünün ve işlem kontrol kimyasal miktarının, alüminyum ve magnezyum toz partikül boyutlarına etkisi araştırılmıştır. Artan işlem kontrol kimyasal miktarı ve öğütme süresi toz kalitesinin artışı göstermiştir [52].

İşlem kontrol kimyasalında önemli olan bir diğer hususta kullanma miktarıdır. Az oranda işlem kontrol kimyasalı kullanıldığında toz parçacık boyutunun arttığı, kullanılan işlem kontrol kimyasal miktarı arttığında ise parçacık boyutunun azaldığı, tespit edilmiştir. Öyle ki yaptıkları çalışmada, alüminyum tozlar %1 stearik asitle 5 saat öğütülmesi sonucunda partikül boyutunun 500 µm, %3 stearik asit kullanıldığında ise boyut miktarının 10 µm olduğunu saptamışlardır [52].

5. YÜZEY KAPLAMA İŞLEMLERİ VE AMACI

Yüzey kaplama, yeni bir yüzey tabakası elde etme amacıyla kaynak yöntemleri kullanılarak ana metalden farklı özellikte ve kimyasal bileşimi bilinen bir metal veya alaşımın ana malzeme yüzeyine kaplanması işlemidir. Yüzey kaplama aşınmayı, yıpranmayı, darbeyi, erozyonu ve oyulmayı azaltmak için orijinal parçalara uygulandığı gibi bozulan parçaların tamiri amacıyla da uygulanır. Yüzey işlemleri, taban malzemeye kitlesel olarak sahip olmadığı nitelikler kazandırmakta, daha ucuz ve daha kolay üretilen bir malzemenin sadece yüzeyini değiştirerek istenilen amaca ulaşabilmesini sağlamaktadır. Yüzey kaplama işlemi ergitme kaynak yöntemleri ile yapılabildiği gibi, ısı püskürtme veya lazer kaynak yöntemi kullanılarak da gerçekleştirilebilir [54].

Malzemelerin yüzey işlemleri bir taban malzemenin özelliğini;

1. Kaplama yolu ile (metal-alaşım-bileşik-seramik kaplama, organik kaplama, boya vs., inorganik kaplama cam, beton, emaye gibi)
2. Bir başka maddenin yayındırılması ve taban malzeme ile bileşik oluşturması yolu ile (nitürleme, karbonitürleme, borlama, karbürleme)
3. Taban malzemenin kendisinden kaynaklı oksit katmanlarının Kalınlaştırılması ile (alüminyumun, titanyumun anodizasyonu)
4. Başka maddelerle reaksiyona sokularak daha dayanıklı kılınması (kromlama, fosfatlama gibi)

yolları ile değiştirilmesini kapsar. Yüzey işlemlerinin en önemli avantajı göreceli olarak ucuz bir taban malzemenin yüzeyine yapılacak işlemlerle yüzey-ortam etkileşimine dayanan mühendislik özelliklerinin istenilen şekilde değiştirilebilmesidir. Örneğin TiN kaplamalar yüksek mekanik özellikleri, mükemmel korozyon ve aşınma direnci özelliklerine sahip olmalarından dolayı ortopedik implant malzemelerin ömrünü uzatır [55]. Bir başka örnek ise Cr-Ni esaslı bir paslanmaz çeliğin Co esaslı süper alaşım ile kaplanması malzeme yüzeyini daha sert ve aşınmaya karşı daha dayanıklı bir yüzey haline getirmiştir. Bu sayede hem korozyona hem de aşınmaya maruz bölgelerde kullanılan iş parçaları daha uzun ömürlü olarak yer edinmektedir [54].

Yüzey kaplamanın farklı türleri vardır. Bunlar sırasıyla sert yüzey kaplama, kademeli kaplama, dolgu kaplama ve koruyucu kaplama işlemleri olarak yer almaktadır [56].

5.1. Sert Kaplama

Aşınma, çizilme, çarpılma, erozyon ve oyulmaları azaltmak amacıyla uygulanan bir yüzey kaplama işlemidir. Nispeten ince tabakalar (≤ 3 mm) için uygulanır. Sert yüzey kaplama, dolgu kaplama işlemine göre daha ince bir yüzey tabakası oluşturur ve normalde onarımın ve aşınma direncinin olduğu durumlar için uygundur. Kaynak, ısıl püskürtme veya benzeri kaynak yöntemleri için gerekli yüzey şartı, ısıl işlemler veya alevle yüzey sertleştirme, nitrürleme veya sert yüzey kaplama işlemi olan iyonlama gibi işlemlerle yapılan sert yüzey elde etme işlemlerinden farklıdır. Korozyon ve/veya yüksek sıcaklıkta meydana gelen tufallaşma, aşınma oranında ana etkiye sahip olmakla beraber sert yüzey kaplamalar için doğru malzeme seçiminde önemli bir faktör olabilir [56].

Aşınma kontrolü için yapılan sert yüzey kaplamalar çok geniş bir alanda kullanılır. Başlıca kullanım alanları taş kırma ve ezme makineleri metal-metal aşınmasını minimuma indirmek için gerekli yerler sayılabilir. Sert yüzey kaplama abrasiv aşınmayı kontrol etmek için de kullanılır. Bunlar haddelerde, kazıma takımlarında, ekstrüzyon vidalarında, kesme makaslarında, toprak işleri makinelerinin parçalarında ve kırma makinelerinin parçalarında rastlanmaktadır. Bu kaplamalar aynı zamanda yağlanmamış veya zayıf birbiri üzerinde kaygan metal-metal temasının olduğu kontrol valfleri, kepçe ve traktörlerin iniş takımları ve yüksek performans bilyelerinde kullanılmaktadır Sert yüzey kaplama aynı zamanda aşınma ve korozyonun birlikte görüldüğü yerlerde kullanılır. Bunlara örnek olarak ise çamurlu ortamlarda kullanılan saban, pulluk gibi ziraat takımları, valfler ve pompalar korozyona neden olan sıvılar veya çimento karma makineleri gösterilebilir. Sert yüzey kaplamaları aşınmış parçaların yeniden değiştirilmesi sırasında veya orijinal parçaların aşınmalarını çözümlemek için kullanılırlar [56].

5.2. Dolgu Kaplama

Parçanın istenilen boyuta geri getirilebilmesi için ilave kaynak metalinin ana metal üzerine kaynak yöntemi ile kaplanmasıdır. Bu alaşımlar genellikle aşınmaya karşı direnç için değil aşınmış parçaları yeniden kullanılabilir hale getirmek veya orijinal boyutlarına geri getirmek ya da aşınma etkisine maruz kalan tabakaya uygun destek sağlamak için kullanılır. Dolgu kaplama terimi genellikle 3 mm' den daha kalın kaplamalar için kullanılır. Amacı yüzeye korozyon direnci sağlamaktır. Sert yüzey kaplama ise koruyucu kaplamaya nazaran daha ince kaplama kalınlığına sahiptir. Dolgu kaplama yapılmış ana metal parçalar, düşük alaşımlı çelik basınçlı kazanlar, üre reaktörleri, tüp levhalar, kâğıt kazanları, nükleer reaktör kazanları, hidrolik kırma makineleri örnek olarak verilebilir. Kaplama malzemesi genellikle ostenitik paslanmaz çelik veya nikel esaslı alaşımlardır. Ancak bazen bakır esaslı alaşımlarda kaplama amaçlı kullanılabilir. Bazı özelleşmiş kaplamalar gümüş dolgu metali kullanılarak da yapılabilir. Dolgu kaplama genellikle sualtı ark kaynak yöntemi kullanılarak yapılır. Dolgu malzemesi olarak örtülü elektrotlar, halka şeklinde kaynak telleri ve çıplak elektrotlar kullanılabilir [56].

5.3. Koruyucu Kaplama

Düşük alaşımlı ve düşük karbonlu çelik malzemeye korozyona karşı dirençli yüzey tabakası sağlamak amacıyla uygulanır. Genellikle kalın tabakalar ($\geq 3\text{mm}$) korozyona dirençli sert yüzey tabakası elde etmek için uygulanır. Elektrik ark, toz altı, gaz altı ve plazma püskürtmeli kaynak yöntemleri kullanılabilir [56].

5.4. Kademeli Kaplama

Asıl yüzeye bir veya birden fazla kaynak metal tabakasının kaplanmasıdır. Bu yöntemin koruyucu kaplama yönteminden farkı bazı metalürjik gereksinimlere ulaşabilmesidir. Bu yöntem, gerçekte farklı metal-ana metal birleştirmeleri için uygulanır. Eğer ostenitik paslanmaz çelik dolgu malzemesinin ergimesi bir problem yaratıyorsa, karbon veya düşük alaşımlı bir çeliğin yüzeyine 309 veya 310 tipi bir veya iki tabaka bir

paslanmaz çelik kaplanacağı zaman ilk kademe kaplama katı iyi kontrol edilebilmelidir. İşlendikten sonra ve kaplandıktan sonraki muayene, kademeli kaplanmış çelik parça ile paslanmaz çelik ana metal kaynağı için uygun dolgu metali kullanılarak yapılabilir. Düşük alaşımlı çelik bir parça kademeli kaplamadan sonra ısıtılabilir ve sonra paslanmaz çelik parçaya birleştirilir. Bu yöntem, ostenitik paslanmaz çeliği tane sınırı aşınmasına karşı hassas hale getiren daha sonraki kaynak ısıtılmasından korur [56].

5.5. Yüzey Kaplama Malzemeleri

Yüzey kaplama malzemeleri çok çeşitli alaşımlar, karbürler ve bu malzemelerin bileşimlerinden oluşur. Geleneksel yüzey kaplama alaşımları ince tabaka yüzey kaplama malzemeleri olarak ta kullanılabilirler. Bu malzemeler, çelikler veya düşük alaşımlı demir esaslı malzemeler, yüksek kromlu beyaz dökme demir veya yüksek alaşımlı demir esaslı malzemeler, karbürler, nikel esaslı veya kobalt esaslı alaşımlar olarak sınıflandırılabilirler. Bazen az miktarda bakır esaslı alaşımlar yüzey kaplama işlemlerinde kullanılabilirler; fakat birçok parçada yüzey kaplama alaşımları demir, nikel ve kobalt esaslıdır. Yıllık yüzey kaplama alaşım tüketimi 18×10^6 kg' dır. Bunun % 90 ' ı demir esaslı alaşımlardır [56].

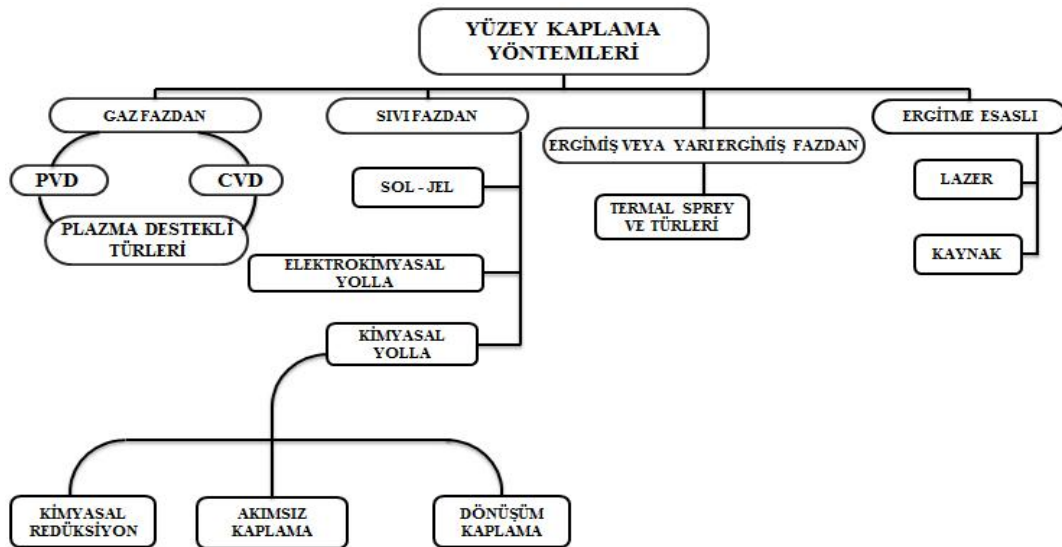
Mikro yapısal olarak yüzey kaplama alaşımları genellikle borürler, karbürler gibi sert çökelti fazlarının daha yumuşak demir, nikel ve kobalt esaslı alaşımlardan oluşan bir matris içinde yer aldığı bir kombinasyondur. Karbürler, demir ve kobalt esaslı yüzey kaplama alaşımlarında sert faz olarak bulunurlar. Demir ve kobalt esaslı sert yüzey alaşımlarında karbon içeriği ağırlıkça %4 civarındadır. Birçok kobalt, nikel ve yüksek oranlı demir esaslı sert yüzey kaplama alaşımları genellikle % 35 üzerinde krom, % 30 üzerinde Mo ve %13 üzerinde W ve az miktarda Si ve Mn içerir [56].

6. YÜZEY KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Yüzey kaplama, malzemelerin yüzeylerinde buhar biriktirme, sol-jel, elektrolitik yöntemler ve çeşitli ergitme işlemlerinin kullanılarak değişiklikler yapılmasıdır. Kaplama sonrası malzeme yüzeyinde aşınma direnci, sertlik artışı ve korozyon direnci gibi tribolojik olaylara karşı daha dayanıklı bir tabaka elde edilir. Kaplamalar malzeme özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılır. Kaplama yöntemleri diğer yüzey işlemlerinin malzemelerin özelliklerini geliştirmede yetersiz kalmaları yüzünden geliştirilmiştir. Kaplama yöntemleri ile elde edilen yüzeyler aşınma direncine daha dayanıklı bir yüzey sağlarken aynı anda diğer mühendislik özelliklerine de büyük oranda etki edebilmektedir [19].

Bu yöntemler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

1. Buhar Fazı (Gaz Fazdan) Yöntemleri,
2. Sıvı Faz Esaslı Yöntemler,
3. Ergitme Esaslı Yöntemler,
4. Ergimiş veya Yarı Ergimiş Faz Yöntemleridir [19].



Şekil 6.1. Yüzey kaplama yöntemleri [19]

6.1. Buhar Fazı Yöntemleri

Bu yöntemlerde; malzemelerin yüzeylerinde sert kaplamalar elde etmek için, çeşitli yöntemlerle elde edilen kaplama malzemesi buharları iş parçası yüzeyinde biriktirilir. Buhar fazı yöntemleri fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) olup, bu iki temel yöntemin çeşitli varyasyonları mevcuttur. Bu yöntemler temelde üç adımda gerçekleşir [19]. Bu adımlar;

- 1.Kaplama malzemesinin buhar fazının oluşturulması: Buhar fazı lazer yoluyla, elektrolitik yöntemle, plazma püskürtmeyle ve patlamalı püskürtme yöntemiyle sağlanabilir.
2. Oluşan buharın kaplanacak malzemeye taşınması,
3. Buhar fazın malzeme üzerinde yoğunlaşması ve ince katı filmin büyümesidir.

PVD işlemlerinde kaplama buharı; kaplama malzemesinin ısıtılması ile yapılan buharlaştırma ile ya da kaplama malzemesinin yüksek enerjili partiküllerle bombardımanı sonucunda malzemedan kopan ve yerinden çıkan partiküllerle sağlanan iyon söktürme işlemleriyle oluşturulur. CVD işlemlerinde ise, kolay buharlaşan bir kaplama malzemesi ile bir gaz, termal ya da diğer yöntemlerle malzemenin yakınında tepkimeye sokulur. Oluşan buhar, katı bir şekilde sıcak ana malzeme üzerinde biriktirilir. PVD ve CVD metotları kullanılarak metaller, alaşımlar ve refrakter bileşikler gibi çok geniş aralıktaki bir malzeme grubuna değişik kaplamaların yapılması mümkündür. Bu yöntemlerde biriktirme miktarı, diğer kaplama işlemlerine göre biraz düşüktür. PVD işlemlerinin çoğu vakum altında yapılır. CVD işlemleri ise atmosferik basınçtaki bir reaksiyon kutusunda yapılabilir [19, 57].

6.2. Sıvı Faz Esaslı Yöntemler

6.2.1. Sol Jel Yöntemi

Sol-jel teknolojisi yüksek kaliteli camları ve seramikleri üretmekte kullanılan önemli bir tekniktir. Sol-jel yöntemi; farklı alt tabaka malzemeleri ve karmaşık geometrili malzemelerin kaplanmasında sağladığı kolaylık, düşük işlem maliyeti ve düşük çalışma sıcaklığı gibi avantajlara sahiptir. Filmler, bir alt tabaka üzerine sol-jel çözeltisinde derin ve ağ biçimli çöktürme ve püskürtme (sprey) ile oluşturulabilir. Organik bileşenlerden uzak bir jel tabakası için ince film 70°C’ de kurutulur ve oluşan kristal tabaka, amorf tabaka ve kalıntı organik bileşenleri pirolize etmek için 400-700°C sıcaklık aralığına kadar ısıtılır [58]. Sol-jel teknolojisi önceden hazırlanmış bir tabakanın hidrolizinin oluşumu ve kısmen hidrolize olmuş ürünlerin bir oksit ağıyla birlikte yoğunlaşması esasına dayanan iki ana kimyasal reaksiyon içerir. Çözelti bir jel haline döndükten sonra kurutularak ve ısıl işleminden geçirilerek son yapı elde edilir. Sol-jel kaplamaların oluşturulmasında öncelikle on çözelti ince bir tabaka şeklinde kaplama yüzeyine dağıtılır ve sol-jel dönüşümü baslar. Jel tabakası termal işlemlerle kuruma ve yoğunlaşma/kristalleşme aşamalarından geçirilir. Klasik sol-jel kaplama metotları karmaşık metal parçaların kaplanmasında yeterli olmamaktadır. Kaplama kalınlıkları tek daldırma yada spin kaplamalarda 100–200 nm. düzeylerinde olmaktadır [59].

Sol-jel yöntemi seramik oksitlerin üretimi ile sınırlı kalırken, sol-jel kompozit kaplamaların toz bileşeni; oksit, karbür ve nitrürleri içine alacak şekilde, seramiklerin çoğundan seçilebilir [19].

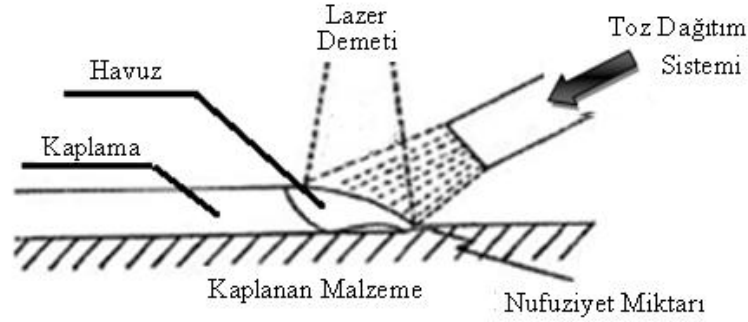
Sol-jel kompozit kaplama yöntemleri; otomotiv ve kalıp elemanları üzerinde üretilen kaplamaları içine alacak şekilde; termal bariyer kaplamalar, yüksek frekanslı tıbbi ve yüksek sıcaklıklı güç çeviricileri için piezoelektrik kaplamalar, düşük sıcaklıklı elektrik yalıtımı için dielektrik kaplamalar gibi uygulama alanı geniş olan bir yöntemdir [60].

6.3. Ergitme Esaslı Kaplamalar

Bu yöntemlerle malzeme yüzeyine ilave sert tabakalar yapılabilmekte, mevcut yüzey değiştirilerek özellikleri geliştirilmekte ve aşınmış bir bölgenin tamiri yapılırken daha da güçlendirilmesi söz konusu olmaktadır. Malzeme yüzeyinde bu şekilde ilaveler yapılması için klasik kaynak tekniklerinden olan elektrik ark, toz altı, ve gaz altı kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. İlk yatırım maliyetleri ve uygulamaları pahalı olmasına rağmen, lazer ışını ve elektron ışını kaynak teknikleri de kaplama uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle uygulanan kaplamalarda genel olarak malzemede bozulma ve çarpılmalar, yüzey hassasiyetlerinin düzeltilmesi için talaşlı imalat ihtiyacının oluşması gibi dezavantajlar mevcuttur [19].

6.3.1. Lazer İle Yüzey Kaplama

Lazerle yüzey kaplama; lazer teknolojisi, bilgisayar destekli tasarım ve imalat (CAD/CAM), robotlar, sensörler ve kontrol ile toz metalürjisi gibi bir çok konuyu bir araya getiren yeni kaplama tekniğidir. Bu kaplama yönteminde lazer bir ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Hareketli alt tabaka üzerine istenen ilave metal ince bir tabaka halinde yüzeye geçirilir. Yüzeye geçişecek metal; alt tabaka üzerinde önceden hazırlanmış tozun enjeksiyonu, yüzeye toz püskürtülmesi ya da tel besleme yolu ile kaplanacak malzeme yüzeyine aktarılır. Bunların arasında en etkili yöntemin, toz enjeksiyonu yöntemi olduğu söylenebilir. Bir çok farklı malzemenin toz enjeksiyonlu lazer kaplama yöntemi kullanılarak, kalınlığı 0.05-2 mm' ye ve genişliği de 0.4 mm' ye kadar değişen katlar üretilerek, yüzeyinin kaplanması kolaylıkla mümkündür. kaplama uygulamalarının katılması, imalat ve prototip üretiminde tam bir devrim olmuştur [19]. Şekil 6.2'de lazer kaplama tekniği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Lazer kaplama işleminin şematik gösterilişi [19].

Yöntem; özellikle havacılık, sağlık ve otomotiv endüstrisinde geniş bir yer bulmuştur. Lazer kaplamayla elde edilen yüzeyler; abrasiv, eroziv ve adhesiv aşınma etkilerinin yanı sıra; nemli ortam korozyonu ve yüksek sıcaklık korozyonuna büyük direnç göstermektedir.

Bazı uygulama alanları ise şöyledir:

- Delici takımlarda kullanılan millerin üretimi,
- Motor supap yataklarının hazırlanması,
- Takımların yüzeylerinde sert tabakaların oluşturulması,
- Hidrolik pompa parçalarının üretiminde ve Kalıp yüzeylerinin sertleştirilmesinde

kullanılmaktadır [19].

6.3.2. Toz Altı Kaynağı İle Kaplama

Tozaltı kaynak tekniğinde; sürekli beslenen çıplak bir tel elektrot ve birleşmenin üzerine ayrıca eklenen granül ya da toz halinde bir koruyucu bulunmaktadır. Ark bu toz tabakasıyla tamamen kapalı olduğundan yüksek akım değerleri çevresel ortamdan etkilenmeden rahatlıkla kullanılabilir. Yapılacak işleme göre düşük akımlar, çok çeşitli kaynak hızları, koruyucu toz akısı ve tel kombinasyonları kolaylıkla ayarlanabilmektedir. İşlem sırasında ark gözükmediği için güvenli bir yöntemdir. Alternatif ve doğru akım kullanılarak birden çok tel ile işlem yapmak mümkündür. Doğru akım derin nufuziyet sağlarken, alternatif akım ve ilave teller, yüksek kaynak metali

birikmesine olanak sağlar. İşlem akımları 1000 A değerlerine kadar çıkabilir. Tozaltı kaynağında genellikle 400 A değerlerinde çalışılmaktadır. Çeliklerin birleştirilmesinde kullanılan koruyucu tozların özelliklerine dikkat edilmeli ve işlem bittikten sonra yüzeyde oluşan yapıların taşlanarak giderilmesi gerekir. Tozların akışkan hale getirilmesinde genellikle asit karakterli malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde kaynakla birleştirilen çeliklerin; kırılma tokluğu, aşırı sertleşme ve hidrojen gevrekliğinden ileri gelebilecek çatlamalara karşı işlem sonrası kontrol edilmesi gerekir [19].

6.3.3. Gaz Tungsten Ark (GTA veya TIG) ile Kaplama

Gaz tungsten ark kaynağında ark, ergimeyen bir tungsten elektrotla is parçası arasında sağlanırken, koruyucu gaz olarak argon veya helyum kullanılır. Bu yöntemde ark ana malzemeyi ergitmek için kullanılır ve gerekiyorsa ilave metal bir telle sağlanır. Genellikle alternatif akım alüminyum alaşımları ve doğru akım da demir alaşımları için kullanılmaktadır. İşlem elle veya mekanize bir şekilde yapılabilir. Bu yöntem düşük akımlı mikro plazma işlemine benzemektedir. GTA ile çeşitli malzemelerin çok hassas kaynakları yapılabilir [19].

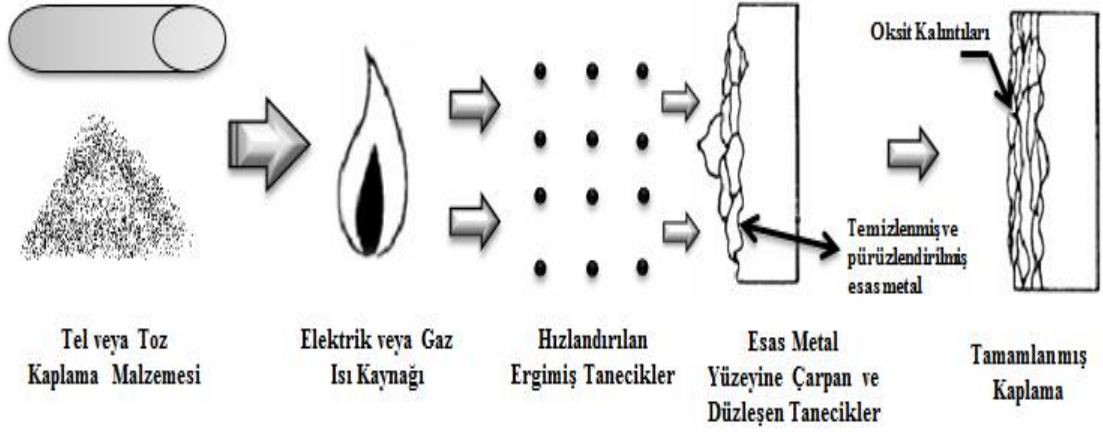
GTA kaplama ile aşınmış yüzeylerin yeniden oluşturulması ve çeşitli ilavelerle bu yüzeylerin daha dayanıklı hale getirilmesi mümkündür. Kolay uygulanan bir işlemdir. Küçük alanlara ve deliklere bu yöntemle kaplama yapılabilir. Kaplama kalınlıkları 2 mm ve üstüne çıkarken kaplama biriktirme miktarı 2 kg/saat değerlerine kadar ulaşmaktadır. Yöntemle çok yüksek kaliteye sahip kaplamalar elde edilebilir. İşlemin yavaş olması ve geniş yüzeylerin kaplanmasında yetersiz kalması kullanımını sınırlamaktadır. Bu yöntemde kullanılan cihazların pahalı olması ve koruyucu gazlarla çalıştığı için belirli bir çalışma alanı gerektirmesi dezavantajları arasında sayılabilir. Küçük parçaların kalın kaplamaları için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [19].

6.4. Ergimiş veya Yarı Ergimiş Fazdan Üretilen Kaplama

6.4.1. Isıl Püskürtme Yöntemleri (Termal Sprey)

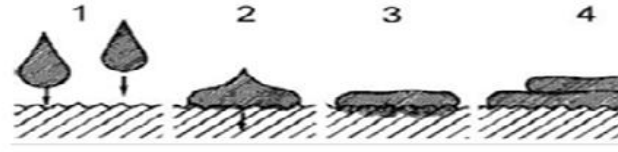
Termal püskürtme kaplama yönteminde; tel, çubuk veya toz şeklindeki kaplama malzemeleri bir püskürtme tabancasında yanıcı, yakıcı ve taşıyıcı gazların yardımıyla püskürtülerek malzeme yüzeyinde bir kaplama katı oluşturulur. İşlemin yapılışı ve kullanılan malzemeye göre değişen farklı uygulamalar mevcuttur. Bunların arasında toz tel alev püskürtme, elektrik ark püskürtme, plazma püskürtme, patlamalı püskürtme (D gun) ve yüksek hızlı oksî-yakıt (HVOF) püskürtme bulunmaktadır. Bu yöntemlerle tungsten, alümina, krom karbür, nikel, titanyum ve demir esaslı tozlar gibi geniş bir aralıktaki kaplama malzemeleri kullanılmaktadır. Nikel ve kobalt esaslı krom, bor ve silisyum alaşımları, tungsten karbürü benzer malzemeler aşınma problemine karşı büyük gelişmeler sağlamıştır. Bu yöntemlerle aşınmaya karşı koruma, tamir amaçlı yüzey kalitesinin düzeltilmesi ve orijinal parça üretimi yapılabilmektedir. Termal püskürtme yöntemleri, havacılıkta (kompresör, yanma odaları), kimya-petrokimyada (pompa, valf, kılavuz ve hadde parçalarında), otomotivde (piston, segman yatakları) ve medikal uygulamalarda (implant) yaygın olarak kullanılmaktadır [19].

Termal püskürtme işlemleri; metaller, seramikler ve polimerler gibi çok çeşitli kaplama malzemelerinin çok farklı ana malzemeler üzerine yapılabildiği kaplama yöntemlerini içerir [42]. İşlem yapılırken kaplama malzemesinden ısı yoluyla elde edilen ergimiş ya da yarı ergimiş partiküller malzeme yüzeyine doğru hızlı bir şekilde gönderilir. Sonuçta yüzeyde oluşan bağlanma ve hızlı katılaşma ile bir kaplama yapısı oluşur. Kaplamanın sertliği işlem parametrelerine, kullanılan kaplama malzemesinin türüne ve ana malzemeye göre değişmektedir. Termal püskürtme yöntemleri farklı enerji kaynakları ve uygulama metotlarına sahip olmasına karşın, temelde dört ana kısımdan oluşur. Bunlar; ergimiş/yarı ergimiş partikülün taşınması, kaplama malzemesiyle temas, alt tabakaya ısı transferi ve kaplama tabakalarının katılaşması ve birbirine tutunmasıdır. Bu durum Şekil 6.4'te gösterilmiştir [19].



Şekil 6.3. Isıl püskürtme işlem sırası [61].

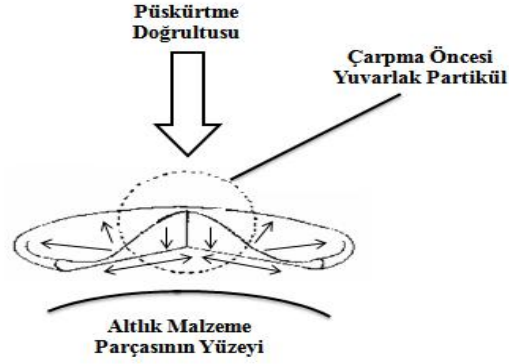
Isıl püskürtme yöntemiyle elde edilen kaplamalar genelde yüksek aşınma direncine sahip oldukları için tercih edilirler. Kaplama yapılmış yüzeyin sertliği ve yoğunluğu kaplamada kullanılan ekipmana ve kaplama parametrelerine göre değişim gösterir. Genelde partikül hızı arttıkça elde edilen yüzeyin sertliği ve yoğunluğu artar. Yüzey sertliği ve yoğunluğu parça sıcaklığı ve kullanılan atomizasyon gazının çeşidine göre de değişir. Kaplamadaki porozite de uygulanan ısı püskürtme prosesi, kaplama parametreleri ve kaplama malzemesine göre değişim gösterir. Bazen yüzeyler ısı püskürtmeyle kaplanarak korozyona karşı dayanıklı bir yüzey elde edilmek istenir. Böyle durumlarda işletme ortamının sıcaklığı ve kimyasal özellikleri de göz önüne alınarak korozyona dayanıklı bir malzeme ile kaplama yapılır ve esas metalin korozif ortama maruz kalması önlenir [6].



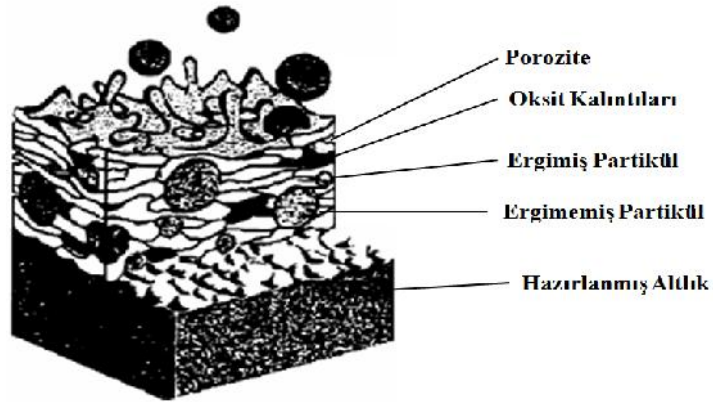
Kaplamanın Oluşumu

- 1) Sıvı partikülün taşınması
- 2) Çarpışma
- 3) Kaplanacak malzemeye ısı transferi
- 4) Katılaşma ve tabakanın birbirine tutunması

Şekil 6.4. Termal püskürtme yöntemlerinin gösterilmesi [19].

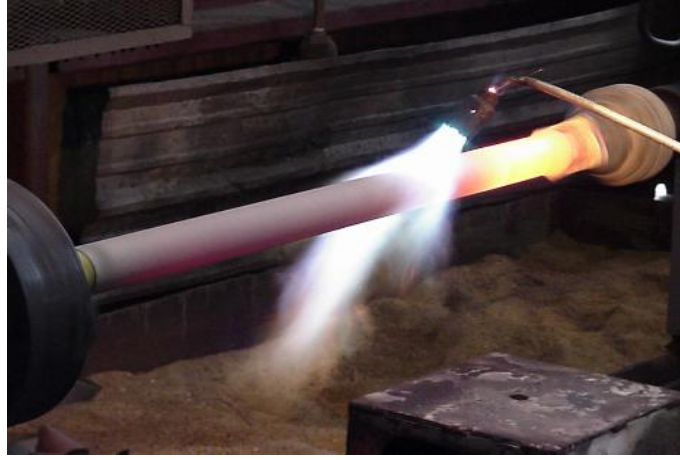


Şekil 6.5 Çarpma kuvvetine bağlı olarak ergimiş partikülün yüzeyde levha şeklini alması [62,63].



Şekil 6.6 Termal püskürtme kaplama yapısı [62,63].

Yüksek hız ile yüzeye çarpmalarda ergimiş partiküller yüzeyde ince levha şeklini alırlar. Altılığa hızlı ısı akışına bağlı olarak çok hızlı şekilde soğuyan bu levhasal yapılar ani olarak katılaşırlar ve deforme olurlar. Bu levhalar başarılı bir şekilde birbirleri üzerine tutunarak birikirse ince bir kaplama yapısı oluşmuş olur. Bu kaplamalar genellikle dört temel bileşenden meydana gelirler. Bunlar; porozite, oksit kalıntıları, ergimiş partiküller ve ergimemiş partiküllerdir. Bu tipik bileşenler ve kaplama yapısı da şekil 6.6 da görülmektedir [62,63].



Şekil 6.7. İş parçası yüzeyinin termal spreyle kaplanmasının gerçekleştirilmesi [64].

Termal spreyle yöntemlerine etki eden başlıca faktörler şunlardır:

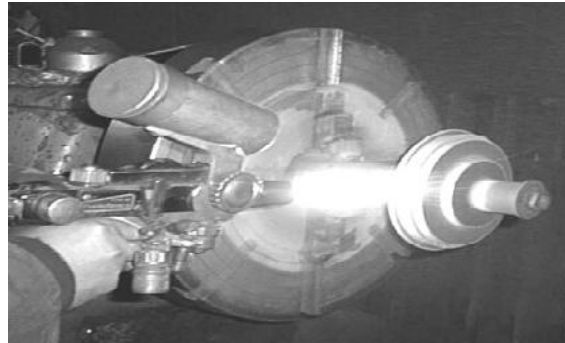
1. Termal kinetik enerjinin oluşturulması,
2. Sprey malzemesinin enerji etkileşimi,
3. Sprey partiküllerinin kaplanacak malzemeye etkileşimi.
4. Sprey akışının (alev, plazma vb.); bileşim, sıcaklık, hız, spreyle mesafesi, dış ortam ve çalkantı (türbülans) etkileri,
5. Malzeme beslemenin; Partikül ya da tel boyutu ve şekli, ilerleme, enjeksiyon metodu ve geometrisi, taşıyıcı gaz, akış şekli ve hızı, kimyasal ve fiziksel özellikleri.
6. Kapanacak malzemenin; yüzey bileşimi, yüzey profili, sıcaklık, kimyasal ve fiziksel özellikleri, spreyle tabancasına göre hızı.

7. Sprey tabancasının; lüle geometrisi, gücü, gaz akışları ve gaz bileşiminin kaplamaya önemli etkilerinin olduğu unutulmamalıdır [19].

6.4.1.1. Alev Püskürtme (Flame Spray) Yöntemi

Bu püskürtme sistemi, yüzeye kaplanması düşünülen tel veya tozların, püskürtme memesi içerisinde ergitilerek kaplanacak olan alt malzeme yüzeyine püskürtülmesi şeklinde çalışmaktadır. Yanıcı gaz-oksijen alevinde püskürtülen telin ergimesi için oldukça yüksek bir alev sıcaklığına ihtiyaç vardır. Bu durumda da ancak oksijen-yanıcı gaz alevi ile sağlanabilmektedir. Alevle püskürtmede hava-yanıcı gaz alevi kullanılmaz. Yanıcı gaz genellikle asetilen olup düşük ergime noktasına sahip malzemeler için bazen bütan/propan ve ince tozların püskürtülmesi durumunda hidrojen de kullanılmaktadır. Bütan ve propan gazlarının yerine tercihen asetilen gazının kullanılmasının sebebi ise, asetilenin daha yüksek alev sıcaklığına ve tutuşma hızına sahip olmasıdır [2].

Diğer yandan depolanması zaten çok zor olan hidrojenin bu tür işlemlerde kullanımı hem tehlikelidir ve hem de en üst düzeyde güvenlik önlemlerinin alınmasını gerektirir (Yıldırım, 1974). Asetilenin oksijenle oluşturduğu alevin en yüksek sıcaklığı 3200 °C ve propanın ise 2800 °C' dir. Düşük ergime sıcaklığına sahip metallerin püskürtülmesinde, daha çok propan gazı kullanılır. Fakat yüksek sıcaklıklarda ergiyen metallerin püskürtülmesi durumunda asetilen gazı kullanmak gerekir [2].

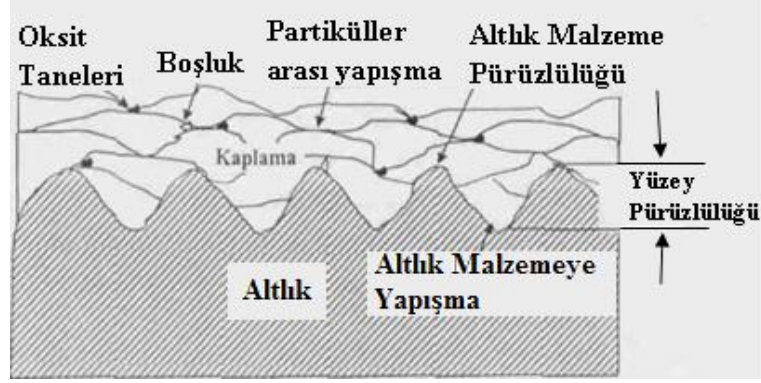


Şekil 6.8. Alev püskürtme yönteminin torna tezgahında uygulanması [65].

Alev püskürtme yönteminin düşük ilk yatırım maliyeti, yüksek dolgu oranı ve düşük bakım masrafı en önemli olan üstünlükleridir. Ancak, daha düşük bağlantı mukavemeti, kaplama tabakasındaki yüksek boşluk seviyesi ve düşük çalışma sıcaklığı yöntemin olumsuz olan özeliğidir. Bu yöntem, aşınmış veya tolerans dışına çıkmış parçaların yenilenmesi amacı ile endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüze kadar bir seri ısı püskürtme yöntemleri geliştirilmekle beraber bu yöntemlerden özellikle alev ile püskürtme yöntemi; düşük ilk yatırım maliyeti, kolay uygulanabilirliği ve düşük bakım masrafı ile uygulamada yaygın olarak kullanılmakta ve toz veya tel şeklindeki malzemeler püskürtülebilmektedir [6].

Alev püskürtme kaplamaları normal olarak yaklaşık 50 mikrometreden birkaç milimetreye varan kalınlıklarda kullanılır. İhtiyaç duyulan kaplama kalınlığı, uygun kaplamanın seçiminde genellikle büyük rol oynar. Alev püskürtme, yıpranmış parçaları kurtarmak, yüksek sıcaklık ve ortam sıcaklığında korozyonu önlemek için kullanılabilmesine rağmen işlemin en geçerli kullanımı aşınmaya, erozyona yada aşındırmaya karşı direnç sağlamasıdır. Alev püskürtme, diğer püskürtme proseslerindeki gibi bir soğuk proses olarak kabul edilmektedir. Öyle ki altlık malzemesi çok sınırlı bir sıcaklık yükselmesini sağlamaktadır. Bu sıcaklık yükselmesi yaklaşık olarak 200°C civarındadır [6].

Alev ile püskürtme yönteminde 25-30 Mpa bağlantı mukavemetli, % 10-15 aralığında değişen boşluk miktarı, saatte 0.5-0.6 kg çökeltme oranı ve % 15'e kadar oksit bileşenli kaplamalar elde edilmektedir. Alevle püskürtme yöntemi ile elde edilen metalik kaplamalardaki boşluk miktarı, püskürtme, işleminden sonra kaplama yüzeyine uygulanan ısıtma işlemi ile (oksi-asetilen veya endüksiyon ısıtma gibi) azaltılabilir. Bu yöntem ile sıfır boşluk seviyeli kaplama tabakası ile esas metal ve kaplama tabakası arasında güçlü bağlanma elde edilmektedir [6]. Alev püskürtme kaplama tabakasının yapısı şekil 6.9' da görülmektedir.



Şekil 6.9. Alev püskürtme tabakası [6].

Alev Püskürtme tekniği kaplama malzemesinin formuna bağlı olarak iki sınıfa ayrılır:

- a) Toz alev püskürtme
- b) Tel alev püskürtme [6].

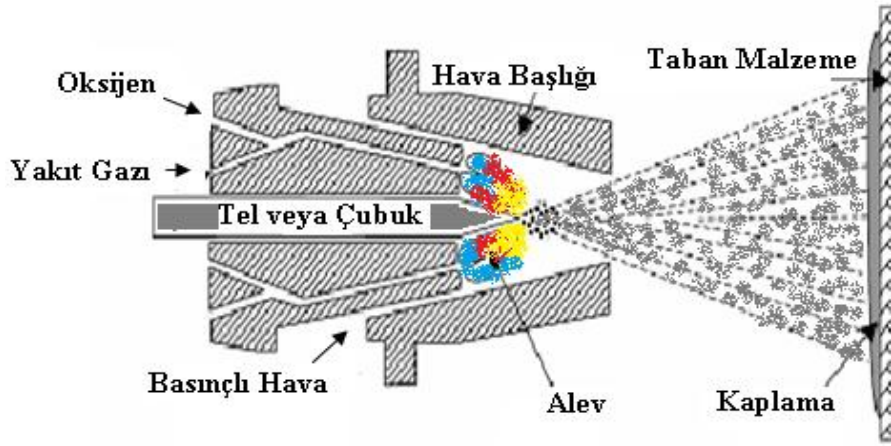
6.4.1.1.1 Toz Alev Püskürtme

Toz alev püskürtme tekniğinde toz formunda üretilen metal alaşımları vakum yardımı ile oksit-asetilen alev içerisine beslenir. Ergiyen metaller iş parçası yüzeyine taşıyıcı gaz yardımı ile taşınmaktadır [6].

Alev spreyleme, diğer spreyleme proseslerindeki gibi bir soğuk proses olarak kabul edilmektedir. Öyle ki altlık malzemesi çok sınırlı bir sıcaklık yükselmesini sağlamaktadır. Bu sıcaklık yükselmesi yaklaşık olarak 200 °C civarındadır [20]. Kaplama esnasında iş parçasının sıcaklığı 200 °C'yi geçmediğinden altlık malzemede herhangi bir distorsiyon ve metalürjik dönüşüm görülmemektedir [6]. Bu konu detaylı olarak Bölüm 7 de ele alınacaktır.

6.4.1.1.2 Tel Alev Püskürtme

Tel alev püskürtme, tel halinde üretilmiş ve ergime sıcaklığı oksii-asetilen alev sıcaklığının altında olan herhangi bir metalin kaplanacak yüzeye püskürtülmesi olayıdır. Kapanacak metal tel, sürücü ile püskürtme tabancasının nozuluna beslenmektedir. Tel nozul içinden geçerken oksijen ve yanıcı gaz karışımı yardımı ile ergitilmektedir. Ergimiş metal yüksek basınçlı hava ile atomize edilerek kaplanacak yüzeye püskürtülmektedir. Bu yöntemde alevin fonksiyonu metalin ergitilmesini sağlamaktır. Kapanan yüzeyin sıcaklığı 95-200°C arasında değişmektedir [41]. Tel alev püskürtme ile, biriktirilecek metal makara yada halkadan tabancaya sürekli bir şekilde temin edilir. Bazı durumlarda kesilmiş metal çubuklar kullanılır [6].

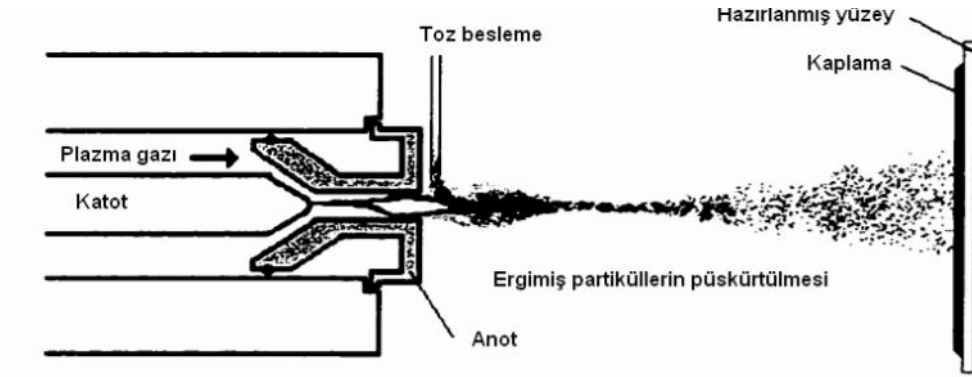


Şekil 6.10. Tel malzemeler için alev sprej sistemi [66].

6.4.1.2. Plazma Püskürtme Tekniğı

Plazma püskürtme prosesi temel olarak alev püskürtme ile aynı olmakla beraber, püskürtme malzemesinin eritmek için gerekli olan yüksek sıcaklığın elektrik potansiyelinden üretildiğı bir sistemdir. Tabanca ucunda meydana gelmiş elektrik arkına gönderilen gazların iyonize olması ile yüksek sıcaklık kaynağı olan plazma elde

edilmektedir. Bu iyonize gazlar ile birlikte ergimiş partiküller yüksek hızla tabanca nozülünden altlığa doğru gönderilirler. Püskürtme tozunun ergiyip sıvı faza geçeceği en yüksek sıcaklık bölgesine besleme yapılmaktadır. Bazı zamanlarda hidrojen ve helyum ile argon ve nitrojen gibi inert gazlar, püskürtme malzemesinin hızını ve sıcaklığını kontrol etmek için kullanılırlar. Plazma püskürtme tabancası, tungsten (katot) ve bakır (anot)'ın bulunduğu iki elektrottan oluşturulmuştur. Tabanca içindeki kanallarda plazma kaplama prosesi boyunca soğutmayı sağlamak için su dolaşmaktadır [62].



Şekil 6.11. Plazma püskürtme prosesinin şematik görünümü [63].

Prensip olarak direkt su ile soğutulan ve ucu bir meme şeklinde daralan ve de anot olarak kullanılan bir zarf ve merkezinde izole edilmiş olan katottan oluşur. Bu üfleçten geçen gaz (argon, helyum, hidrojen içeren azot) anot ve katot arasında teşekkül eden arkta ısınır ve iyonize olarak memeden bir plazma jeti halinde çıkar. Bu jetin çıkış hızı 5000 ila 6000 m/sn ve sıcaklığı ise 15000 ila 25000°C' dir. Toz halindeki püskürtme malzemesi plazma jetinde erir ve parça üzerine püskürtülür [61].

Plazma püskürtme yöntemi, ergime sıcaklığı ne olursa olsun yüksek kaliteli kaplamaların üretimini sağladığından; makine parçalarının yüzey özelliklerinin değiştirilmesinde veya iyileştirilmesinde başarı ile kullanılmaktadır. Bunun yanında; yüksek ergime noktalı malzemelerde kaplamaları yenilemek amacıyla, özel karakteristiklerin gerekli olduğu uygulamalar da kullanılmaktadır. Buna karşılık plazma

püskürtme yöntemi, çelik yapılar üzerine korozyona dirençli koruyucu kaplamalar (örneğin çinko, alüminyum vb.) oluşturmak için ekonomik değildir [19].

Bu proseste altlık malzeme spesifik soğutma aygıtlarıyla nispeten düşük sıcaklıklarda tutulabilir. Bu yöntemde düşük sıcaklıktan dolayı (200°C) distorsiyon olmadığından son halinde işlenmiş malzemeler kaplandığında mikro yapılarında değişme meydana gelmez [6].

Plazma sprej işleminin en önemli özellikleri şu şekilde sıralanabilir: Metallerin, seramiklerin veya bunların bir kombinasyonu şeklinde hazırlanmış malzemelerin kullanılabilmesi, oluşturulan kaplamaların ince, sütünsal olmayan ve eş eksenli tanelerden oluşması, yüksek biriktirme değerlerine ulaşılabilmesi ve çeşitli suni ortamlar altında sorunsuzca çalışabilmesidir [25].

Plazma sprej yöntemi uçak ve uzay endüstrisinde kullanılan parçalarda korozyon ve oksitlenme önleyici kaplamaların üretilmesinde kullanıldıktan ve başarılı bulunduktan sonra termal bariyer amacıyla uçak veya gaz türbin kanatlarında kullanılmaya da başlanmıştır. Daha sonra kağıt, çelik üretimi, tekstil, enerji, elektrik, kimya, petrol endüstrisi, otomotiv bir çok alanda da korozyon ve oksitlenme direncinin artırılması, termal bariyer, elektriksel direnç ve yalıtım, radyasyon yalıtımı, biyolojik uyumluluk gibi amaçlar için kullanılmaya başlanmıştır [67].

6.4.1.3. Elektrik Ark İle Püskürtme

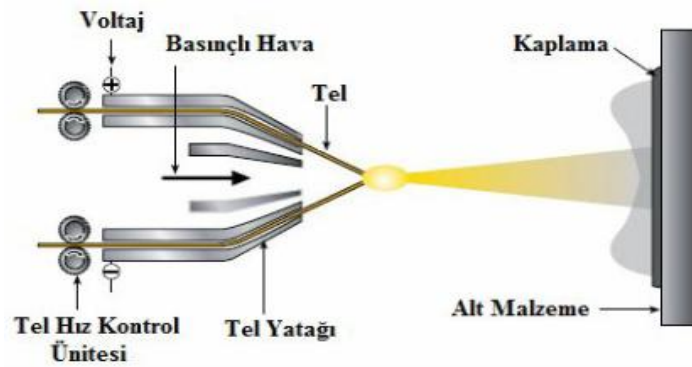
Ark Püskürtme sistemi, püskürtme tabancasında metalik malzemeleri ergitmek için gerekli olan ısıyı elektrik arkından yararlanan bir prosestir. Şekil görüldüğü üzere elektrik arkın olmasında iki elektrot olarak iki metalik tel kullanılmaktadır [62].

Ark oluşturulduğunda sıcaklıklar 6000 °C' nin üzerine kadar çıkmaktadır. Sıkıştırılmış hava ergimiş malzemeyi atomize ederek kaplama malzemesinin yüzeyine doğru yönlendirir. Bu işlemde kısmen sünek ve elektriksel iletkenliğe sahip kaplama malzemeleri kullanılmaktadır [68]. Bu işlemde kullanılan teller, tel ile alev püskürtme işleminde kullanılan tellerle benzerdir. Elektrik ark püskürtülmüş kaplamalar alevle püskürtülmüş kaplamalar ile kıyaslandığında çeşitli üstün özelliklere sahiptir [69].

Bunlar:

- 1) Çökelme hızı daha yüksektir.
- 2) Yüksek bağ mukavemetine sahiptir.
- 3) Kaplamanın maliyeti daha düşüktür.
- 4) Kaplamadaki oksit miktarı azaltılabilmektedir [2].

Elektrik ark püskürtme yönteminde diğer termal püskürtme yöntemlerinde olduğu gibi ayrıca bir ısı kaynağına (alev ya da elektrikle oluşturulmuş plazma gibi) ihtiyaç yoktur. Bu yöntemde iki tel elektrot bir elektrik arkı oluşturur ve yüksek ark sıcaklığında ergime meydana gelir. Ergimiş partiküller atomize bir halde sıkıştırılmış hava ile hızlandırılarak kaplanacak malzemeye yönlendirilir. Bu yöntemle karıştırılmış metallerin, bakırın ve paslanmaz çeliğin kaplamasını yapmak mümkündür [19].



Şekil 6.12. Elektrik ark püskürtme sisteminin şematik görünüşü [2].

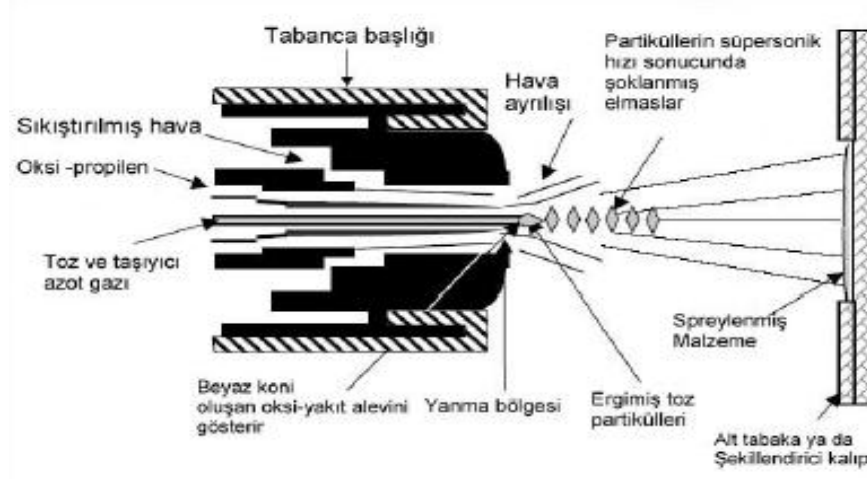
Bu yöntemde atomizasyon için genellikle sıkıştırılmış hava kullanılsa da argon ya da azot gibi soy gazlarında kullanıldığı görülmektedir. Sıkıştırılmış hava metal partiküllerin oksitlenmesine neden olur ve kaplamada büyük miktarlarda metal oksitler bulunur. Bu şekilde oluşan kaplamalar çok daha sert ve işlenmeleri çok güç olmaktadır.

Bu yöntem için temel uygulama çelik yapıların korunmasıdır. Örneğin bu yapılar atmosfer ve deniz korozyonundan etkilenen köprüler ve sahile yakın platformdaki çelik yapılardır. Ark spreyleme düşük karbonlu çelik, % 13 kromlu çelik ve alüminyum bronzları gibi malzemelerle, eskimiş miller, yataklar ve muyluları doldurmak için de kullanılır [70].

6.4.1.4. Yüksek Hızlı Oksi Yakıt (HVOF) Püskürtme Tekniği

Yüksek hızlı oksi-yakıt püskürtme (HVOF) yöntemi, mükemmel mekanik özelliğe sahip kaplamalar elde etmekte kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemle eriyik haldeki partiküller süpersonik hızlara çıkabilirler ve kazandıkları kinetik enerji sayesinde yoğun, düşük poroziteli, yüksek yapışma mukavemetine sahip kaplamalar üretilebilir. HVOF sisteminde oksijen ve sıvı veya gaz haldeki yakıtın karışımı kullanılır [66]. Bu yöntemdeki en önemli fark gaz yakıtı yerine sıvı yakıtı kullanımıdır. İşlem, alev püskürtme işlemine benzer olarak kaplama tabakasını oluşturan malzemenin sıcaklık etkisi ile ergitilmesi ve daha sonra kaplamanın yapılacağı yüzeye gönderilmesi işlemidir. Ancak yanıcı gaz olarak kullanılan propan, propilen veya hidrojen, HVOF tabancası içerisindeki bir odada alev ile püskürtme işleminde kullanılmadan önce çok daha yüksek basınçlarda patlatılır. Ayrıca alevle püskürtme işleminde yanıcı-yakıcı gazın birleşimi tabanca dışında meydana gelmekte, buna karşın HVOF yönteminde ise tabanca içerisinde gerçekleştirilmektedir. Genleşen gaz jetinin nozul yardımı ile hızı daha da artırılır ve kaplama tabakası meydana getirecek tozun jete eklenmesi ile ses üstü (550-800 m/sn) bir hızda kaplama işlemi gerçekleştirilir [6]. Toz malzemenin kazandığı yüksek kinetik enerjiden dolayı tamamen ergimeye gerek yoktur. Parçacık yarı ergimiş halde ve plastik deformasyona uğramış bir şekilde taban malzeme üzerine çarpar ve yüzeye yayılarak kaplamayı oluşturur [66].

Diğer ısıl püskürtme yöntemleriyle karşılaştırıldığında bu yöntemde kaplama, alt tabakaya daha iyi bağlanmakta, yüksek sertlik değerleri elde edilmekte ve daha az gözeneklilik meydana gelmektedir [66].



Şekil 6.13. HVOF sprey tabancasının enine kesitinin şematik görünüşü [68].

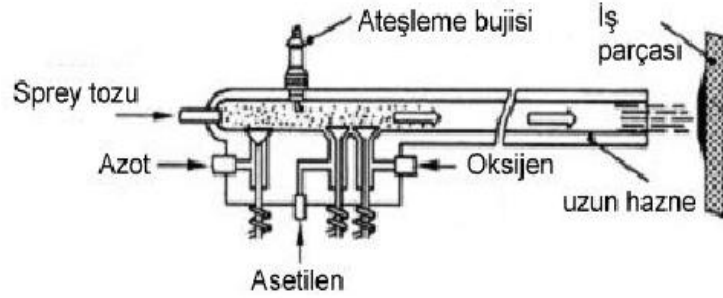
Temelde çok basit olmasına rağmen toz besleme konumu, gaz akış oranları ve oksijen/yakıt oranı gibi önemli parametreleri vardır [71]. HVOF yöntemi ile gerçekleştirilen kaplama tabakaları, son derece düşük artık gerilmeler içeren kaplamalardır. Bu kaplamalar 12 mm' ye kadar kalınlıkları, tamamen homojen bir kaplama tabakası mikro yapısı, püskürtme işleminde parça sekline daha az bağımlılık, kaplama tabakasının kimyasal bileşiminde esneklik, kaplama tabakasında düşük oksit bileşenleri, düşük gözeneklilik, yüksek bağlantı mukavemeti gibi özellikler göstermektedir [61]. Geleneksel püskürtme prosesleri içerisinde en yüksek bağ dayanımı ($> 70 \text{ MPa}$) ve en düşük oksit içeriği (%1-5) HVOF' a aittir [71].

6.4.1.5. Patlamalı Püskürtme (D - Gun)

Patlamalı püskürtme (D-gun) yöntemi, bir seri patlamalarla ergimiş ve hızlandırılmış partiküllerin kaplanacak malzemeye yönlendirilmesiyle elde edilir. Bir kapsül içindeki toz

karışımı ve oksî-asetilen gazı tutuşturulur. Tutuşmadan sonra bir patlama dalgası içine giren toz partiküller hızlanır ve yüksek sıcaklıklara ulaşır. Her patlamadan sonra, kapsül içine azot püskürtülerek temizleme yapılır ve işlem saniyede birkaç kez tekrarlanır. Patlamalı püskürtmeyle elde edilen kaplamaların kalitesi oldukça yüksektir. Partikül hızları yüksek ve sonuçta oluşan kaplamalar yoğun ve yüksek bağlanma mukavemetine sahiptir. Yöntemin uygulanmasının kısmen pahalı olması en önemli kısıtlarından biridir. Ayrıca 140 desibel gibi yüksek gürültü oluşturması nedeniyle özel ses yalıtımı ve patlamaya dayanıklı hücreler gerektirmesi, yöntemin dezavantajları arasındadır [19].

Patlamalı püskürtme ve HVOF yöntemleri arasında başlıca farklar; farklı yakıt gazları kullanılması, soğutma sistemleri ve patlamalı püskürtmede yanmanın zaman ayarlı bir bujiyle yapılmasıdır. Bunların dışında, ilke olarak her iki yöntem de aynıdır [66].



şekil 6.14. Patlamalı püskürtme işlemi ile termal spre y kaplama [72].

Bu yöntemde patlamayla oluşan alev sıcaklığı ile toz partiküller yaklaşık 3000-3500 C ısıtılır, esas malzemenin sıcaklığı ise CO₂ soğutma sistemi ile 150 C' nin altında olup ergimiş damlaların hızı 800 m/s dolaylarında bulunur. Bu şekildeki yüksek hızlı damlalar, esas metal üzerinde boşluk seviyesi düşük (% 0.5-1) ve iyi bağlanmış kaplamalar meydana getirir. Bu yöntemle tungsten karbür gibi refrakter malzemelerin çok yüksek yoğunluklu kaplamaları yapılabilir. Patlamalı püskürtme yönteminde, her vuruşta yaklaşık bir metre uzunluğundaki uzun bir hazne içine belirli miktarda kaplama tozu alınarak, oksijen ve genellikle yakıcı gaz olarak asetilen karıştırılır. Karışım bir buji ile tutuşturularak kontrollü

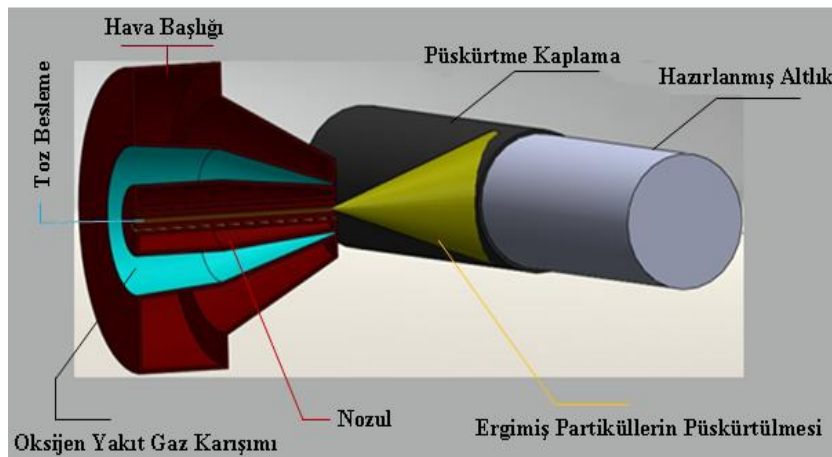
bir patlama gerçekleştirilir ve bunun hazne boyunca yayılması sağlanır. Patlamayla partiküller, üzerinde yüksek sıcaklıklar ve basınçlar (1 MPa) oluşturularak haznenin sonunda kaplanacak malzemeye doğru yönlendirilir. Bu yöntemle çok yüksek bağlanma mukavemetleri ve yoğunlukların yanı sıra düşük oksitlenme derecesi elde edilmektedir [19].

Patlamalı püskürtme yöntemi, sadece kaplanacak malzeme yüzeyinde gördüğü belli bir alana işlem yapabilen bir yöntemdir. Her bir patlamada yaklaşık 2.5 cm çapında ve 2  m kalınlığında daire şeklinde bir kaplama bölgesi oluşturulur. Kaplamalar bu nedenle, sıkı paketlenmiş mercimek tanelerine benzer bir yapıda yüzeye kuvvetli bir bağla bağlanmaktadır. Yeni tabancalarla geliştirilen kaplamalar (UCAR 2000 Serisi) aşınma direncini geliştirirken yorulma performansına etki etmemektedir. Bu sistemler yorulmaya karşı hassas olan uçak parçalarında kullanılmaktadır [19].

7. TOZ ALEV PÜSKÜRTME TEKNİĞİ

Bu yöntemle toz halindeki ilave metal bir sevk gazı ve sevk düzeneği ile iletildiği oksii-asetilen alevi içinde eritilir ve asetilen oksijen karışımının yanması ile oluşan genleşme yardımıyla hızlandırılır (kinetik enerji) ve kaplanacak parça yüzeye püskürtülür. Bu metotla, püskürtülecek malzeme, huniden tabancaya toz formunda temin edilir. Huni tabancadan uzak yada ona gömülü olabilir. Toz aleve hava besleme sistemi, oksijen akıntısı yada çekim kuvveti (ağırlık) ile taşınır yada emilir. Gelen toz sıkıştırılmış hava jetiyle yada yanma gazlarıyla altlık malzeme üzerine gönderilir [6].

Toz püskürtmede ince parçacıklar birçok ısı kaynağının içinden sevk edilirken ergimiş ya da yarı ergimiş hale gelirler; bir alt yapıya çarptıklarında yassılırlar ve ince plaklet veya lamel haline gelerek yüzeyin herhangi bir düzensizliğine karşı uyum gösterirler. Yüzey, bu iş için önceden pürüzlendirildiğinde, bu düzensizlikler, terk edilen parçacıklara takılma (demirleme) yeri oluşturur. Bu parçacıklar, bu kez, arkadan gelenlere takılma yeri teşkil eder ki böylece ortaya bir dolgu oluşumu hasil olur. Bu mekanik bağlantı boyunca partiküllerin noktasal olarak ergimesi ve oksitlerin birbirleri ile bağlanması meydana gelirse de bu durumdaki bağlantı mekanizması, mekanik bağlantı olarak ifade edilmektedir [6].



Şekil 7.1. Toz malzemeler için Alev sprej yöntemi [6].

Soğuk püskürtmede is parçası 300°C' yi geçmemelidir. Eğer geçecek olursa zaman zaman soğutmak gerekir. Bundan dolayı malzemede sıcaklık artışı fazla olmadığından, metalik yapı değişikliği ve boyutsal çarpılmalar meydana gelmez. Bu tür kaplamalarda kaplama tozu püskürtülmeden önce yüzeye bağlama özelliği olan astar tozu atılır. Son zamanlarda üretilen soğuk kaplama tozlarının bazıları astar gerektirmeden de kullanılabilir [6]

Soğuk püskürtme işlemi makine tamirinin hemen her tarafında kullanılırlar. Bu işlemler saf bakır hariç bütün metallerde uygulanabilirler. Dönen iş parçası 100 ila 300 °C arasında bir ön tavlama tabii tutulur. Daha sonra 200 mm mesafeden toz püskürtme yapılır ve hemen arkasından ergitme işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntemle toz metalin ana malzemeye kaynaması sağlanır. Toz metalle yüzey kaplandıktan sonra kaplanmış kısım ikinci bir hamlaçla ısıtılarak gerek tozun metalle, gerekse tozun tozlarla tam olarak kaynaşması sağlanır. Böylece partiküller arasındaki gözeneklilik minimuma indirilir [6, 73].

7.1. Yüzey Kaplama Öncesi Yapılan Uygulamalar

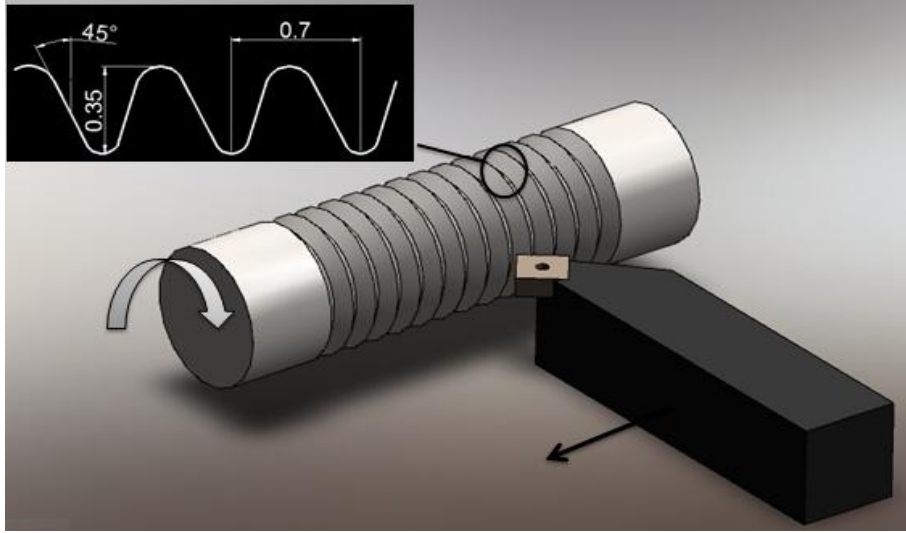
Kaplanılması düşünülen yüzey yani alt tabaka ve püskürtme birikintisi arasındaki bağ tipi mekanik, metalürjik, kimyasal yada bunların kombinasyonu olabilir. Bu alt tabaka malzemesi, yüzey malzemesi ve formu, termal spreyleme metodu ve prosedürleri yada yüzey hazırlamaya bağlıdır. Bunlardan uygun yüzey hazırlama, güçlü bir bağ elde etmenin en önemli ilk adımını oluşturur [20].

Güçlü bir bağ elde etmek için ilk önce, yüzey ve buna bağlı bölgeler yağ, oksit, kir ve diğer yabancı maddelerden arındırılmış olmalıdır. Temizlik, spreyleme işleminden önce yapılmalı ve işlem sırasında korunmalıdır. Özel tutma ve saklama prosedürü bundan emin olacak şekilde korunmalıdır. Dökme demir gibi malzemeler kum püskürtme ile temizlenebilirler. Döküm üzerine basınçlı hava püskürtülür ve oksit kabuğu mekanik olarak kaldırılır. Küçük işletmelerde kum püskürtme aspiratörlü odalarda yapılır fakat işlemin dışarıdan kumanda edilmesi daha yerinde olur. Kum püskürtme temizlenecek

malzemenin yüzeyini etkiler ve bazen de mat bir yüzey arzu edildiğinde son işlem olarak kullanılır [6].

Kumlamadan kasıt, alüminyum oksit (zımpara maddesi) köseli zerrelerin (genelde demir-çelik malzemelerin pürüzlendirilmesinde kullanılır) veya silisyum karbür zımpara maddesinin (genelde pik ve emsali malzemenin pürüzlendirilmesinde kullanılır), is parçası üzerinde toz bırakmayacak şekilde temizlenmesi ve pürüzlendirilmesidir. Bu amaç için çeşitli tane iriliğinde aşındırıcı malzemeler temin edilmelidir. Kumlamadan sonra en geç 1-2 saat içerisinde püskürtme işlemine geçilmeli ve parçanın kirlenmemesine dikkat edilmelidir [6].

Yüzey temizleme işleminden sonra yüzeye tutuculuk kazandırmak için özellikle dairesel parçalarda torna kalemı ile metal toz püskürtülecek yüzeye sekil 3.4’de görüldüğü gibi diş açmak suretiyle tutuculuk kazandırılır. Diş yüksekliği adımın yarısı kadar olmalıdır. Genellikle yüzeyin toz püskürtme ile doldurulması gereken yerlerinde 0,7 mm adım ve 0,35 mm derinlik olacak şekilde yüzey tornalanır [6].



Şekil 7.2. Toz püskürtülecek yüzeye tornada diş açarak tutuculuk kazandırma [6]

Bazı malzemelerin yüzeyini işlemek veya püskürtme ile aşındırmak zor olabilir. Bazen de hiç mümkün olmaz. Bu gibi durumlarda Ni-Al alaşım tozları bağ mukavemetini artırıcı

bağ tabakası olarak yaygın bir şekilde kullanılırlar. Bu tozlarla, ekzotermik bir reaksiyon meydana gelmekte ve bu reaksiyon sonucu bağ mukavemeti artırılabilir. Spreyleme esnasında, püskürtmenin yapılmasını istemediğimiz bölgeler, koruma bantları veya koruma boya ile kapatılır ve bu suretle buralara püskürtülen malzemenin yapışması önlenir. Kumlama operasyonunda da bu bölgeler, cam elyaf esaslı yanmayan yapışkan bantlar ile korunur. Operasyon sonrası bu örtüler yerlerinden söküldüğünde, kaplamanın istenmediği kısımlar aynen kalır [6].

Tablo 7.1. Yüzey Hazırlama Yöntemlerinin Başlıca Kullanım Yerleri [6].

Hazırlama usulleri	Kullanma Yerleri	Malzeme Cinsi	Düşünceler
1-Mekanik bir hazırlama yapmadan yalnız üzerindeki yağ, oksit ve diğer pislikleri temizlemek	Güzel bir dış görünüşün temininde, elektrik akımını iletmede, ısı izolasyonunda, ateşe ve ısıya karşı korumada	Tahta, plastik malzeme, karton, porselen ve çeşitli taşlar gibi	Püskürtme tabakası 0.3mm kadar
2- Kum püskürtme	1. kısımdakilere ek olarak korozyona ve kavlamaya karşı korumada	Bütün çelik cinsleri, kır dökme demir, demir olmayan metal ve alaşımlar	Püskürtme tabakası 0,5 mm kadar
3- Çelik kumu püskürtme	1 ve 2. kısımdakilerin aynısı		
4- Tornalama, planyalama, frezeleme, delme ve keskilme	Tamirat işlerinde, yatakların püskürtülmesinde, 1 mm'den kalın korozyona karşı koruma tabakalarının püskürtülmesinde	Bütün çelikler, kır dökme demir, demir olmayan metal ve alaşımları gibi bütün metalik malzeme için	0,5 mm den kalın püskürtme tabakaları için
5- Nikel, Tungsten ve karbon elektrotla (elektriki yolla) yüzeye girinti çıkıntı verme	Dinamik zorlamalara maruz kalmayan parçalarda ve dökme demirin tamirinde. Elektriki arkla yapılan hazırlamadan sonra yüzeye hafif bir kum püskürtme ile temizleme yapılmalıdır.	Düşük karbonlu alaşımsız çelikler, dökme çelikler ve dökme demir	0,5 mm den kalın püskürtme tabakaları için de tatbik edilebilir. Düşük akım şiddeti ile ark söndürülmeden yapılmalı

Püskürtme öncesi yüzeye uygulanan işlemler tamamlandıktan sonra parça vakit kaybetmeden tezgaha bağlanıp püskürtme işlemine geçilmelidir. Toz alev püskürtme ile yüzeyi kaplanacak dairesel kesitli is parçaları torna tezgahına salgısız bir şekilde

bağlanmalıdır. Salgının olması bir çok mahsurlar ortaya çıkarır. Parçalar uzun ise, bir ucundan puntoya alınmalı ve torna kızaklarının ısıdan ve dökülen tozlardan etkilenmemesi için paravan kullanılmalıdır. Düzlem yüzeyli parçalarda ise kaplanacak parçalar sabit, hareketli olan püskürtme tabancası ile yüzeyin her iki yönünde dalgasız ve yüzeyin her yerinde eşit olacak şekilde istenen kaplama kalınlığı elde edilene kadar işleme devam edilir. Birçok temel malzemelerde, is parçasına 90 ile 150°C arasında ön ısıtma yapılmalı ve termal spreyleme işlemi sırasında bu sıcaklık korunmalıdır. Bu işlem, yüzey yoğunlaşmasını, alt tabaka enleşmesini önler ve soğuma esnasında birikintideki stresleri azaltır [6].

7.1.1. Optimum Püskürtme Parametreleri

Yapılan kaplamanın özellikleri kullanılan kaplama malzemesine, ısı püskürtme yöntemine ve proses parametrelerine göre değişir. Isıl püskürtme yöntemiyle elde edilen kaplamalar genelde yüksek aşınma direncine sahip oldukları için tercih edilirler. Kaplama yapılmış yüzeyin sertliği ve yoğunluğu kaplamada kullanılan ekipmana ve kaplama parametrelerine göre değişim gösterir. Genelde partikül hızı arttıkça elde edilen yüzeyin sertliği ve yoğunluğu artar. Yüzey sertliği ve yoğunluğu parça sıcaklığı ve kullanılan atomizasyon gazının çeşidine göre de değişir. Kaplamadaki porozite de uygulanan ısı püskürtme prosesi, kaplama parametreleri ve kaplama malzemesine göre değişim gösterir [6].

7.1.1.1. Alev Ayarı

Alevle püskürtme işleminde daima nötr (normal) bir alev kullanılmalıdır. Alüminyum püskürtülmesinde alev hafif karbonlayıcı (asetileni fazla) olmalıdır [74]. Basıncın püskürtme sırasında sürekli olarak sabit kalması gerekmektedir. Bu basınç ayarları oksijen için 4 bar, asetilen için de 0,7 bar basıncında olacak şekilde düzenlenmelidir [61, 73, 75, 76, 6].

7.1.1.2. Püskürtme Hava Basıncı

Alevle püskürtme işleminde tozun pülverize olup ivmelenerek esas metale ulaşması basınçlı hava ile sağlanır. Yanıcı ve yakıcı gazların akışı da buna yardım eder. Püskürtme sırasında basınç sabit kalır. Toz alev püskürtme yönteminde optimum püskürtme mesafesi olan 100-200 mm den püskürtme yapılırken hava basıncı 2 bar olarak ayarlanır [75, 76, 6].

7.1.1.3. Püskürtme Mesafesi

Kaplama genel olarak 100 ila 200 mm arasındaki bir mesafede yapılmaktadır. İnce sac veya ısıya karşı hassas malzeme üzerine püskürtme yapılırken bu mesafe büyük seçilir. Çarpılmaların fazla olduğu veya yapışma mukavemetinin kritik bulunduğu hallerde (alüminyum) ilk tabaka kısa püskürtme mesafesinde ve hızlı püskürtülür. Eğer püskürtme hızı yavaş olursa, püskürtülen tabaka kısmen yanar [75, 76, 6].

Püskürtme ucu ile is parçası arasındaki uzaklığın soğuk ve sıcak püskürtme sistemlerinde ve kaplama usullerinde çok önemli bir fonksiyonu vardır. Alev ise yakın olursa fazla etkili olan sıcaklığın etkisi ile metal üzerinde karıncalaşmalar ortaya çıkar [73, 6].

7.1.1.4. Püskürtme Demetinin Püskürtülen Yüzeye Düşüş Açısı

Püskürtme demetinin, püskürtülen yüzeyle teşkil ettiği açı 45°den küçük olmamalıdır. Aksi takdirde püskürtülen tabaka sünger gibi bir hal alır. En iyi netice 70 ila 80°' lik bir düşüş açısı ile sağlanmaktadır [74].

7.1.1.5. Püskürtme Hızı ve Kaplama

Dönmekte olan is parçasının toz püskürtme ile kaplanacak yüzeyi esas alınarak parçaya devir sayısı verilmelidir. Her zaman devir sayısı parça çapı ile ters orantılıdır. Eğer çap büyüyorsa devir sayısı küçülür, çap küçülüyorsa devir sayısı büyümelidir [6].

İşin dönme hızı: $n = 10.000 / d_k$ formülünden bulunur.

n = is parçasının dakikadaki dönme sayısıdır (dev / dak)

d_k = Kaplanacak malzemenin çapıdır. (mm)

10.000 = Püskürtmeyle yüzey kaplamada esas alınan sabit bir sayıdır [73].

İş parçasının dönme sayısı tespit edildikten sonra parçanın ilerleme hızı belirlenmelidir. Toz alev püskürtme yöntemine ilerleme hızı 3 mm/devir ila 5 mm/devir arasında olmalıdır [6].

Ekonomik bakımdan, dar açılı bir püskürtme demetinin kullanılması gerekir. Böylece kalınlığı düzgün olan bir püskürtme tabakası sağlanmış olur. Dar açılı püskürtme kullanılması halinde, tabancanın ilerleme hızının yüksek olması gerekir. Böylece istenilen kalınlıktaki püskürtme tabakası bir kaç defada ve her bir tabaka bir öncekine dik olacak şekilde püskürtülür. Kenarlar daima, ilk önce ve 45°'lik açı ile püskürtülmelidir [74, 6].

7.1.1.6. Püskürtülen Tabakanın Sıcaklığı

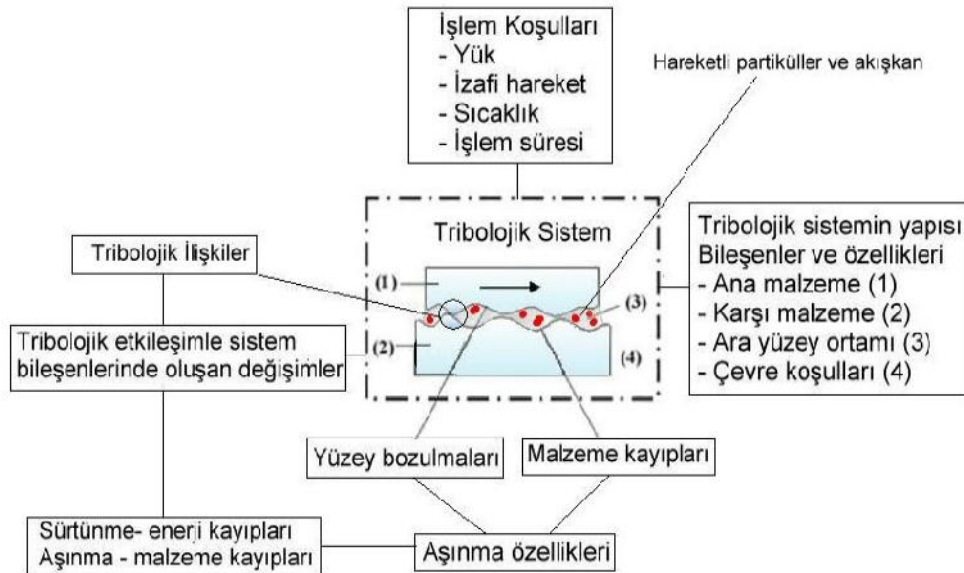
Kötü iklim veya atölye şartlarında, kum ile temizlenmiş yüzeylerde ince bir tabaka halinde su filmi kalır. Bu durum, iyi yapışmayı engeller. Bu sebepten yüzeylerin püskürtme işleminden önce 60 ila 80°C bir ön tavlamaya tabi tutulması gerekir. Genel olarak; kum ile temizlemeden sonra püskürtme hemen yapılmalıdır. Bu arada süre üç saati geçerse yapışma iyi olmaz [6].

8. AŞINMA PRENSİBİ VE TEORİSİ

Temas halinde olan malzemelerin sürtünmesi ve bunun sonucu meydana gelen aşınma özellikleri; makine elemanlarının ve tasarımlarının en önemli problemlerinden biri olarak yer almaktadır. Çünkü temas eden yüzeylerde, sürtünme kuvvetler güç kaybına teşkil eder iken, aşınma ise işleme toleranslarının kötüleşmesine sebep olmaktadır [77].

Aşınma genel olarak tanımlayacak olursak, katı yüzeylerden mekanik yolla istenmeyen bir şekilde malzeme kaybının ortaya çıkması olayıdır. Üretilmiş parçaların değiştirilmesine neden olan kusurların basından gelmektedir. Aşınmaya harcanan maliyet, tamir ve değiştirme surelerinin yol açtığı kayıpların tüm ülkeler için ne kadar büyük olacağı kolaylıkla anlaşılabilir [78, 19].

DIN 50320 ve ASTM G4093 standartlarına göre aşınma, “kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması sonucu mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılmasıyla meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması” şeklinde tanımlanmaktadır [79, 19].



Şekil 8.1. Bir tribolojik sistemin DIN 50320 normuna göre şematik gösterimi [19]

Aşınmayı mekanik sistemler genelinde ifade edersek; kesici uç ve ağızlarında, yataklarda, pistonlarda, dişlilerde, subaplarda, tekerleklerde, frenlerde, kırma ve öğütme değirmenlerinde, yol, toprak ve ziraat makinelerinde, türbin kanatlarında, maden cevherleri üretim cihazlarında vb. yerlerde meydana gelmektedir. Herhangi bir yerde aşınma oluşabilmesi için genel olarak aşağıdaki faktörlerin mutlaka yer alması gerekir. Bunlar, esas yani ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük, izafi hareket ve çevre (ortam) gibi unsurlardır. Bu unsurların etkisiyle ya parça kopması yada atom düzeyinde parçacık ayrılması şeklinde aşınma gerçekleşmektedir [79].

Aşınma olayı esnasında, meydana gelen mekanik enerji ve bunun ısı enerjisine dönüşmesiyle malzemenin aşınma yüzeyinde, daha çok kimyasal ikincil reaksiyonlar meydana gelerek sınır tabakası çözünür. Aşınma nedeniyle ortaya çıkan hasar, daha çok parçanın şeklinin ya da ölçülerinin değişmesi, ısınmadan dolayı malzeme yüzeyinde yapı değişmesinin oluşması şeklindedir [80, 20].

Aşınmaya etki eden bu unsurlar kısaca aşağıdaki şekilde açıklanabilir [80]:

- ❖ **Aşınan Eleman (esas malzeme):** Ayrıca Malzemenin kristal yapısı, malzemenin sertliği, elastisite (Young) modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlüğü ve malzemenin boyutu ana malzemeye bağlı faktörlerdir [19].
- ❖ **Aşındıran Eleman (karşı malzeme):** Aşınmanın oluşmasında başlıca öneme sahip olan karşı sürtünme elemanıdır. Katı bir cisim, sıvı ya da gaz olabilir. Bu eleman temel sürtünme elemanı ile birlikte bir aşınma çiftini oluşturmaktadır.
- ❖ **Ara Malzeme:** Aşınan ve aşındıran malzemeler arasında katı, sıvı, gaz, buhar yada bunların karışımı şeklinde bulunan elemandır. Örneğin; bu ara maddeyi, aşınma esnasında yüzeyden kopan parçacıklar oluşturabileceği gibi, yüzeyler arasına herhangi bir nedenle girmiş kum taneleri de ara maddesi olabilirler.
- ❖ **Yük:** Aşınmaya etki eden kuvvetin büyüklüğü, türü (statik, dinamik, darbeli ya da titreşimli olup olmadığı), doğrultusu ve geçen zaman içerisindeki değişimi yüklemenin şiddetini belirleyen unsurları oluşturur [20].

- ❖ **Göreceli Devinim:** Aşınan elemanın aşındıran elemana göre göreceli devinimin cinsi (kayma, yuvarlanma ya da çarpma etkilerinden hangisinin ağırlıklı olduğu), büyüklüğü ve doğrultusu ile ortaya çıkar.
- ❖ **Çevre (ortam):** Sistemi içine alan ve genellikle sıvı yada gaz halinde bulunan ortamdır. Su, hava ve gazlar teknikte en sık rastlanılan çevre ortamlarıdır [20].

Makine parçaları aşınmaya maruz kaldıklarında çabuk aşınmaları ömürlerinin kısa olmasına ve maliyetin artmasına sebep olur. Onarım için geçen süre ve harcanan para da üretimi önemli ölçüde etkilemektedir. Bu soruna çözüm getirebilmek için aşınmaya maruz kalan makine parçalarının aşınmaya karşı dirençli malzemelerden seçilmesi veya aşınmaya dayanıklı kaplamalarla aşınma yüzeylerinin kaplanması büyük önem arz etmektedir [20].

8.1. Aşınma Direncine Karbürlerin Etkisi

Alaşımın mikro yapılarında bulunan karbürler alaşımın aşınma direncini arttırmada önemli bir rol oynamaktadırlar (Yıldırım, et al., 2007). Mikro yapıda bulunan karbür miktarının artması ve karbürlerin irileşmesi abrasiv aşınma direncini arttırmaktadır. Matris/karbür ara yüzeyinin mukavemeti, karbürler arası mesafe ve abrasiv aşındırıcı ile farklı sertlikteki karbürlerin varlığı da alaşımların abrasiv aşınma direncini etkilemektedir. Karbürlerin çok küçük ve sık dağılımı malzemenin sertliğini artırarak aşınma hızını azaltabilir. Aşındırıcı parçacıkların karbürlerden daha sert olması, ısınma esnasında karbürlerin kesilmesine ve çatlamasına sebebiyet verebilir. Bu durumda aşınma direncinde bir azalma görülür [19].

8.2. Aşınma Direncine Matrisin Etkisi

Matris tarafından yeterli desteğin sağlanmasıyla abrasiv aşınma sırasında karbürlerin dökülmesi önlemediği söylenebilir. Çoğu durumlarda bilhassa ağır abrasiv aşınma şartları altında çatlaklar önce karbür/matris ara yüzeyindeki yüksek gerilme konsantrasyonlarından

dolayı bu bölgelerde başlamaktadır. Daha iyi abrasiv aşınma direncinin matris fazın artan mikro sertliği ile elde edilebileceği düşünülebilir. Her ne kadar sert ve saf metallerdeki sertlik ve aşınma direnci arasındaki ilişki doğrusal olsa da, çok bileşenli alaşımlar için hiçbir basit kural bulunmamaktadır [19].

Abrasiv aşınmada ise, asınmış yüzeylerdeki deformasyon sertleşmeye neden olacak, aşınma yüzeyinde sertliği artıracak ve aşınan yüzeyin sertliği aşınma direncini belirleyecektir. Matris mukavemeti katı eriyik sertleşmesi ile de artabilir. Bazı araştırmacılar yüksek mukavemetli matrisin, karbürlere daha iyi bir destek sağlayabileceğini ve ince partiküllerin daha erken dökülmesini önleyebileceğini ileri sürmektedir [19].

8.3. Aşınma Zaman İlişkisi

Aşınma pratikte ikiye ayrılır. Bunlar;

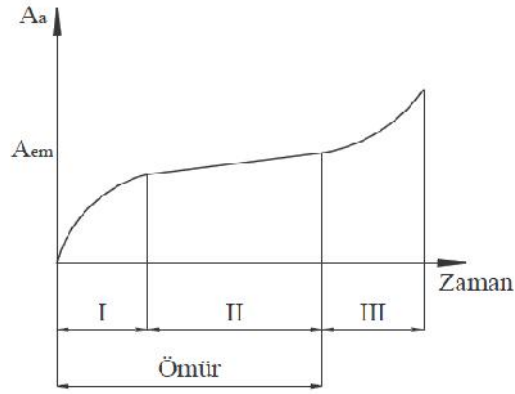
- ❖ Zaman ile gelişen aşınma,
- ❖ Aniden meydana gelen aşınma,

Zamanla gelişen aşınmayı üç safhada incelemek mümkündür. Bu oluşum sürecini açığımızda;

1.Safha (Rodaj Safhası): Bu safha birbirine alıştırma safhasıdır. Bu safhada parçaların ilk çalıştırılması sırasında şiddetli bir aşınma meydana gelir. Bu nedenle parçaların birbiri ile alıştırılmasının iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleştirilmesi bu safhaya ait önemli şartlardır. Genelde alıştırma, yüksüz ve normal hızlardan daha düşük hızlarda yapılır. Alıştırmının iyi ve kısa sürede tamamlanması için bu safhaya ait olan özel ağırlıklar kullanılır.

2.Safha: Bu safhada aşınma, çalışma sırasındaki temas noktalarında meydana gelir.

3.Safha: Bu safhada artan aşınma hızı ile şiddetli aşınma meydana gelir [81].



Şekil 8.2. Aşınma zaman ilişkisi [81].

Aşınan elemana ait, çalışma şartlarına bağlı olarak müsaade edilen bir aşınma sınırı (A_{em}) tayin edilirse, aşınma - zaman diyagramından elemanın normal çalışma zamanı (ömür) tespit edilebilir. Bu zamandan sonra parça değiştirilmeli veya tamir edilmelidir [81].

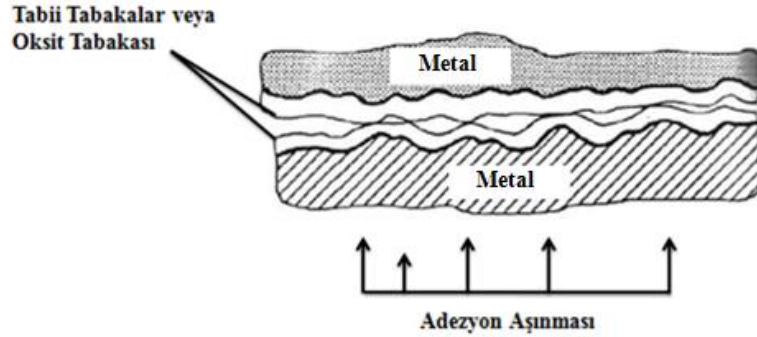
8.4. Aşınma Mekanizmaları

Temel aşınma çeşitleri olarak dört çeşit aşınma mekanizması vardır. Bunlar; adhesiv aşınma, abrasiv aşınma, yorulma aşınması, korozyon aşınma ile; erozyon aşınma, öğütmeli aşınma, oymalı aşınma, kazımalı aşınmadır [19].

8.4.1. Adhesiv Aşınma

Özellikle birbiriyle kayma sürtünmesi yapan, metal-metal aşınma çiftinde meydana gelen kaynaklaşma olayının bir sonucudur. Birbiriyle temasta bulunan benzer kafes yapılı iki metalik yüzey arasında adhezyon kuvveti dediğimiz bir çekim söz konusudur. Bu kuvvetin meydana gelebilmesi için malzemelerin moleküllerinin birbirine çok yaklaşması gerekir. Temas halindeki iki metal, zaten birbiriyle yüzeylerindeki pürüzler vasıtasıyla etkileşirler. Malzeme ağırlığından veya bir dış kuvvet etkisiyle, çok küçük olan pürüz tepelerine gelecek olan basınç veya gerilme çok büyük olur. Bu kuvveti taşıyamayan pürüzler plastik deformasyona uğrarlar. Eğer malzemenin deforme olma kabiliyeti

yüksekse, mikro adhezyon alanları şiddetle temas yüzeyine tamamen yayılır. Böylece yüzeyde emilmiş bulunan sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanır [19].



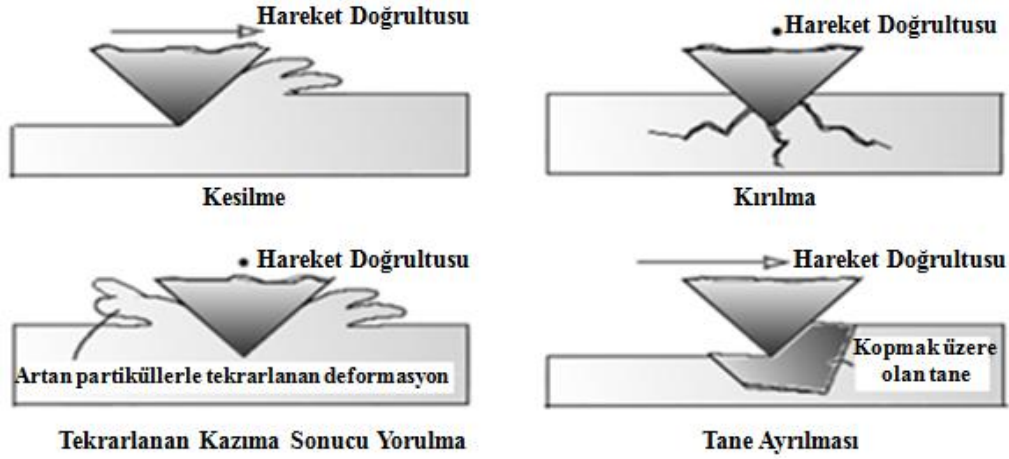
Şekil 8.3. Adezyon aşınması [82, 83].

Bu tür aşınma tipi genellikle iki safhada gerçekleşir. İlk safhada temas bölgesindeki parçacık, yerinde deformasyona uğrar. İkinci safhada ise yerinden kopar ve malzeme yüzeyinden ayrılır. Malzeme yüzeyinden kopan parçacık ya tekrar orijinal parçanın yüzeyine transfer olacak veya düşerek kaybolacaktır [77].

Adhesiv aşınmada en yaygın asimetrik deney normlarından birisi, bir disk üzerine bastırılan pimdir [81].

8.4.2. Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma, bir yüzeyden malzeme kaybına neden olabilen mekanik aşınma yöntemlerinden birisidir. Metal şekillendirmede yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat yöntemleri esasen bu tür aşınmaya dayanmaktadır. Sert parçacıkların yumuşak metale batması da abrasiv aşınmaya neden olabilmektedir. Buna örnek olarak, bir sisteme dışarıdan giren kum vb. gibi parçacıkların veya bir motordaki yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma verilebilir. Bu tip aşınmada sert ve keskin partiküller, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu aşınma, iki elemanlı ve üç elemanlı olmak üzere ikiye ayrılır. İki elemanlı abrasiv aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir (Şekil 8.4) [19].

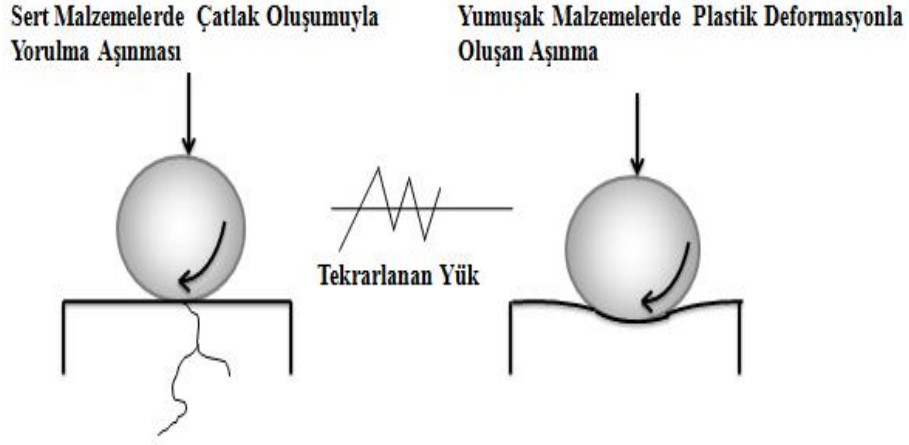


Şekil 8.4. Abrasiv Aşınma Mekanizmaları [19].

Üç elemanlı abrasiv aşınmada ise, aşınan ve aşındıran malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir. Metal-metal sürtünmelerinde aşınma iki elemanlı abrasiv veya adhesiv olarak başlayıp, üç elemanlı abrasiv olarak devam eder. Bu durumda araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro taşlar ve parçalanmış oksit parçaları üçüncü elemanı (ara malzemeyi) oluşturabilir. Serbest hale geçen mikro talaş parçaları, genellikle ana malzemeden daha sert olduklarından dolayı aşınmayı hızlandırır [83].

8.4.3. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, belirli sayıda tekrarlanan titreşim zorlamalarında oluşur [19]. Yorulma aşınması, sürtünme sırasında oluşan gerilmelerin kırılmaya neden olduğu aşınmadır [83]. Yüzeyde oluşan tekrarlı yük sayısının yüksek veya az olusuna göre yüksek çevrimli ya da düşük çevrimli yorulma aşınma mekanizmaları oluşur. Tribolojik zorlanmalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden, yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür. Sonuçta, malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu da, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine neden olur [19].



Şekil 8.5. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi [19].

8.4.4. Erozyon Aşınma

Erozyon ortamı ile malzeme yüzeyi arasındaki hızın çok yüksek olması nedeniyle meydana gelen bozunma olayı olarak tarif edilebilir. Gaz veya sıvı ortamında taşınan abrasiv tanelerin yüzeye belirli bir açıda çarpması ile oluşan enerji, katı cismin basınç mukavemetini aştığı zaman, cismin yüzeyinde plastik deformasyon meydana gelerek yüzeyde kırılmalara sebep olur. Bunun sonucunda yüzeyde aşınma meydana gelir. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya erozyon aşınması denir. Yumuşak malzemeler erozyon aşınmasına çok elverişlidir. Aşındırıcı parçaların büyüklüğü, hızı, şekli, sertliği ve çarpma açısının değeri erozyon aşınma mekanizmasını etkileyen önemli faktörlerdir [84, 83].

8.4.5. Korozyon Aşınması

Özellikle korozyon aşınmada, sıvı ve gazların bulunduğu bir ortamda meydana gelen temaslarda, malzeme yüzeyinde kimyasal ve elektrokimyasal etkilerle reaksiyon ürünleri oluşur. Eğer bu reaksiyon ürünleri yüzeye güçlü bir şekilde yapışır ve ana malzeme gibi davranırsa, aşınma mekanizması aynı ana malzemeninki gibi olabilmektedir. Bazı durumlarda, reaksiyon ürünleri çok daha farklı aşınma mekanizmalarına sebep olmaktadır. Korozyon ortamla katı malzemelerin etkileşimi ile oluşan reaksiyon ürünlerinin baskın olduğu tamamen farklı bir aşınma meydana gelebilir. Korozyon ortamla hızlanmış olan bu

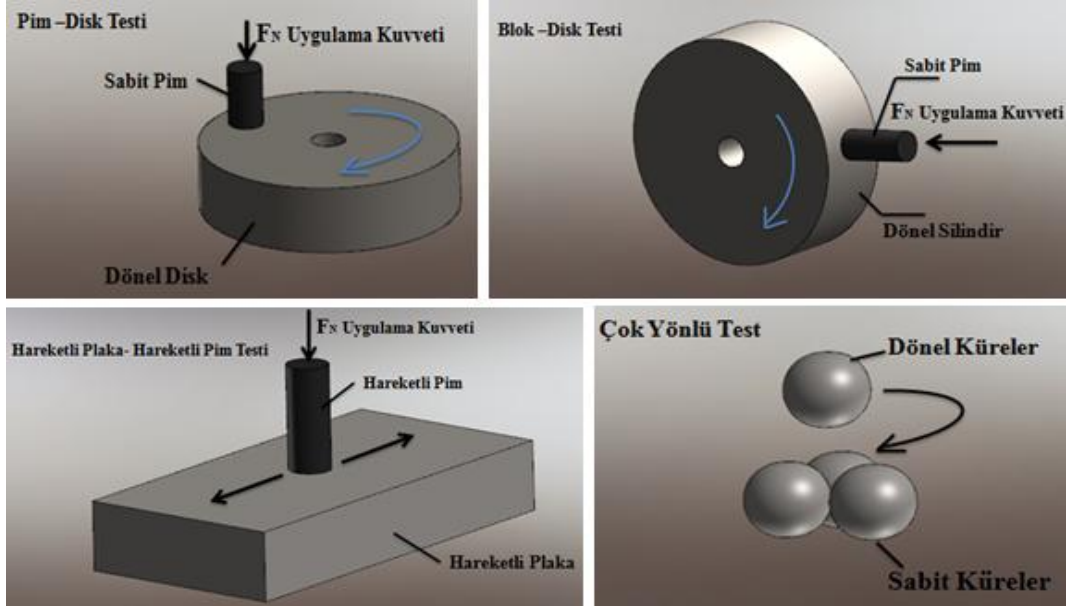
tribokimyasal aşınma, korozyon aşınması olarak adlandırılır. Koroziif aşınmada, tribokimyasal reaksiyonla yüzeyde bir reaksiyon tabakası oluşur. Aynı zamanda, bu tabaka sürtünme ile ortamdan uzaklaşabilir. Bu yüzden reaksiyon tabakalarının kısmen oluşum hızı ve bozulma miktarı aşınma oranını belirler [19].

8.5. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri

8.5.1. Aşınma Deneyleri

Makine elemanlarında aranılan özelliklerden bir tanesi de kullanım ömürleridir. Makine parçalarının çabuk aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyeti arttırdığı gibi, onarım için geçen surede üretimin önemli ölçüde aksamasına neden olmaktadır. Bu nedenle, makine imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmalıdır. Bu malzemelerin tespiti için de mutlaka birçok laboratuvar deneylerinin yapılması gerekir. Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde ana malzemenin bir modeli ile çalışılır. Bu model basit bir geometrik sekle sahip olup, fazla bir masrafa gerek kalmadan üretilebilir ve daha sonra bir deney cihazına takılarak her türlü aşınma ölçme işlemleri bunun üzerinde yapılabilir. Aşınma deneylerinde aşınma ölçüm deney yöntemleri olarak bilinen ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişim ve radyo izotop yöntemleri vardır [79, 19].

Malzeme kaybı olarak tanımlanan aşınmanın ölçümü, temas eden parçalardan birinde veya her ikisinde hacim ve ağırlık kaybı esas alınarak yapılır [79]. Sürtünme, aşınma ve yağlamanın bir karakterizasyonunu veren birkaç teknik vardır. Tribolojik davranışların çalışılmasında basit geometrik kavramlar kullanılır. Bunlar; pim-disk testi, blok-disk testi, çok yönlü (unidirectional) test, hareketli yüzey üzerinde hareketli pim testi olarak sınıflandırılabilir [19].



Şekil 8.6. Aşınma deney türlerinin şematik resimleri [19].

Sürtünme, bir enerji kaybı yöntemidir, bu yüzden uygulanan yükün sürtünme bileşeni kuvvet sensörleri ile ölçülür.

Aşınma deneylerinden elde edilecek bilgiler;

- Kullanılan donanım (temas geometrisi),
- Aşınan pim ve aşındıran diskin ölçüleri,
- Temas eden en az iki malzeme,
- Yüzey durumu,
- Uygulanan normal kuvvet, F_N ve Uygulanan basınç, Pa,
- Kayma mesafesi,
- Zaman, t ve Hız, V ,
- Test sıcaklığı, T ,
- Atmosfer, Yağlayıcı ve Test sayısı [19].

8.5.2. Aşınma Ölçüm Yöntemleri

8.5.2.1. Ağırlık Farkı Metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün, alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Ağırlık kaybının ölçülmesi, 10^{-4} veya 10^{-5} gr hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi yardımı ile yapılır. Aşınma miktarı gram veya mili gram cinsinden ifade edilirse, metre veya kilometre olarak tespit edilen sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (gr/km), (mg/m) ile ifade edilebilir. Ağırlık kaybı birim alan için hesaplanacaksa (gr/cm²) gibi bir birim kullanılabilir. Ağırlık kaybı hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybından hareketle kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığı hesaba katılmak suretiyle, birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından gidilerek bulunabilir [79, 19]

Bu verilerin ışığı altında en çok kullanılan ağırlık kaybı ölçme metodunda kullanılan bağlantı aşağıdaki gibidir [80, 20];

$$W_a = \Delta G / \rho \cdot F_N \cdot s \quad (mm^3 / Nm) \quad (8.1)$$

Buradaki Teknik ifadeler şu şekildedir;

W_a: Aşınma Oranı (mm^3 / Nm)

ΔG : Ağırlık Kaybı (gr)

F_N: Yükleme Ağırlığı (N)

s: Aşınma Yolu (m)

ρ : Yoğunluk gr/cm^3

olarak verilmiştir. Aşınma oranının (W_a) tersi ise, aşınma direnci (W_r) olarak gösterilir [20].

$$W_r = 1 / W_a \quad (Nm / mm^3) \quad (8.2)$$

8.5.2.2. Kalınlık Farkı Metodu

Aşınma sırasında oluşacak boyut değışikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeri ile karşılaştırılması sonucu elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerlerden gidilerek, hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık hassas ölçme aletleri yardımıyla $\pm 1\mu\text{m}$ duyarlıkta ölçülmelidir [79, 19]

8.5.2.3. İz Değışimi Metodu

Sürtünme yüzeyinde, plastik deformasyon yoluyla geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deney boyunca, bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değışimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas piramit veya bilyenin bıraktığı iz boyutlarındaki değışim, mikroskop yardımıyla ölçülerek belirlenir [79, 19]

9. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, toz alev püskürtme tekniği (Flame Spray) ile AISI 1045 malzemesinin takviyeli ve takviyesiz olmak üzere demir esaslı tozlarla yüzeyi kaplanarak, mikro yapı, mikro sertlik ve aşınma dayanımlarına etkileri incelenmiştir. Tüm bu incelemeleri yapabilmek için deneylerde kullanılan yöntemler, deney malzemeleri ve hazırlanması ile ilgili bilgiler aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

9.1. Kaplama Tozları ve Kaplama Altlık Malzemesi

Deneyisel çalışmada kullanılan demir esaslı tozlar ile takviye amaçlı kullanılan tozlar Sulzer Metco firmasından alınmıştır. Çalışmada kullanılan Metco 350 NS ve Metco 101 SF tozlarının kimyasal bileşimleri Tablo 9.1 ve Tablo 9.2 de verilirken, SEM görüntüleri ise sırasıyla Şekil 9.1 ve Şekil 9.2 de sunulmuştur.

Tablo 9.1. Metco 350 NS Tozunun Kimyasal Kompozisyonu [85].

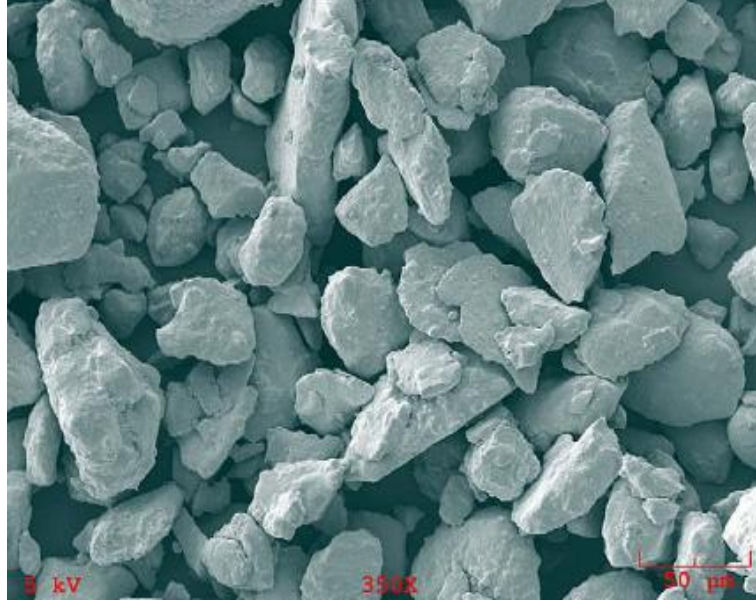
Metco 350 NS	Fe	Mo	C	Mn
%	Geriye Kalan	16-18	2-3	0.25

Tablo 9.2. Metco 101 SF tozunun Kimyasal Kompozisyonu [86].

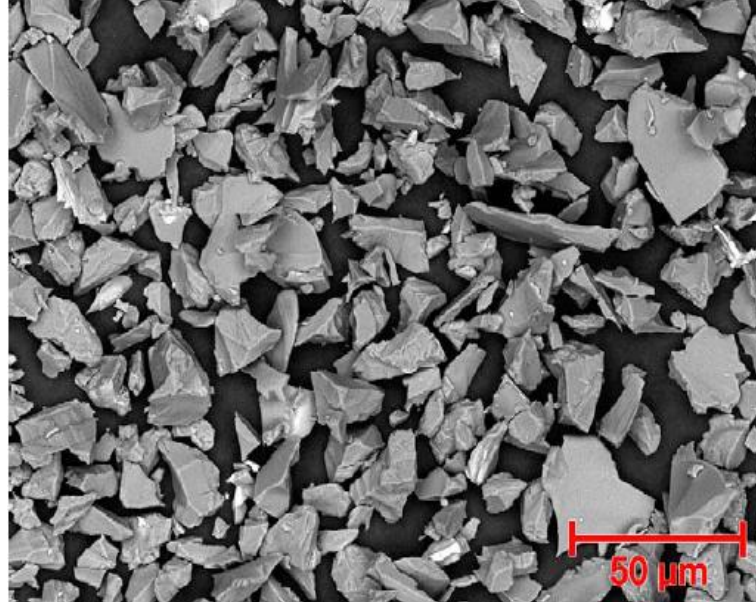
Metco 101 SF	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Cr
%	96	2	0.5	0.5	1

Kullanılan tozlardan Metco 350 NS (-90 +11µm - partikül boyutu), demir molibden kompozit tozu olarak da bilinmektedir. Sert krom malzemelerle oluşturulan kaplamalara alternatif olarak geliştirilen bu malzeme, sert yatak yüzeyleri, eş zamanlı çalışan segman,

konik dişli, pompa contaları, ayrıca aşınmış veya aşınmaya maruz kalan silindir yüzeylerinin kaplanması için kullanılmaktadır.



Şekil 9.1. Metco 350 NS malzemesinin SEM görüntüsü [85].



Şekil 9.2. Metco 101 SF malzemesinin mikron yapıdaki alınmış SEM görüntüsü [86].

Kaplamanın gerçekleştirildiği altlık malzemesi olarak genel makine imalatında kullanılan AISI 1045 malzemesi seçildi. Bu malzemenin kompozisyonları da Tablo 9.3’ deki gibidir.

Tablo 9.3. AISI 1045 Malzemesinin Kimyasal Kompozisyonu

AISI 1045	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
%	Geriye Kalan	0,47	0,29	0,71	0,18	0,03	0,02	0,04

9.2. Takviye Tozlarını Mekanik Alaşımlandırma İşlemi

Deneyisel çalışmalarda ana toz malzemesi olarak kullanılan demir esaslı Metco 350 NS (Fe 16Mo 2C 0.25Mn) tozunda takviye malzemesi olarak kullanılan tozlar ilk önce belirli oranda (Metco 350 NS-%10 / Metco 101 SF-%90) karıştırıldı. Bu toz oranları oluşturulurken Fırat Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan 0,0001 gram hassasiyetinde AND marka GR-200 tipi hassas terazi kullanıldı. Daha sonra, bu karışıma mekanik alaşımlama işlemi uygulandı. Mekanik alaşımlama işlemi yapılırken bu karışım ilk önce yüksek enerjili atritör (öğütme) cihazında (6:1-bilya/toz ağırlık oranı) 40 saatlik öğütme işlemine tabi tutuldu. Öğütme işlemi yine Fırat Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Union Process marka atritör de ortalama 450 dev/dk hızla yapılmıştır (Şekil 9.3). Bu cihazda kullanılan öğütme kabı ve öğütücü bilyeler (5/8 inç çapında) paslanmaz çeliktir.



Şekil 9.3. Deneylerde kullanılan atritör (öğütme) cihazı

Bu öğütme işleminden sonra tozların SEM analizleri Fırat Üniversitesi Fizik Laboratuvarında bulunan cihazda yapıldı (Şekil 9.4). Görüntülerin net bir şekilde oluşturulabilmesi için tozların yüzeyine önce altın kaplama cihazında altın tozu püskürtülerek iletkenliğinin artırılması hedeflendi.



Şekil 9.4. SEM ve altın kaplama cihazı

Ancak yapılan incelemelerde, nano boyutlu bir yapının elde edilmediği görüldü. Daha sonra, aynı karışım 60 saatlik öğütme işlemine tabi tutuldu ve yapılan SEM analizlerinde nano boyutlu bir yapının (100 veya daha düşük nm boyutlarında [87]) oluştuğu görüldü. Bu şekilde bir uygulama ile oluşturulan yeni alaşım, hiç öğütülmemiş haldeki demir esaslı Metco 350 NS tozları içerisinde %5, %10 ve %15 katkı oranlarında ilave edildi.

9.3. Altlık Malzemelerin Kaplama İşlemine Hazırlanması

Kaplama işlemlerinin gerçekleştirildiği Ø10 mm çapındaki AISI 1045 malzemesi (altlık malzemesi) ERA Metalürji firmasından ticari olarak tedarik edildi. Daha sonra bu malzeme CNC torna tezgahında Ø9 mm x 150 mm boyutlarında işlenerek kesildi. Tablo 9.4 te verilen her bir kaplama türü için 2 adet olmak üzere toplam 8 adet altlık malzemesi, kaplama işlemi öncesi yaklaşık 100°C de ön tavlama işlemine tabi tutuldu ve yüzeyleri nemden arındırıldı.

Tablo 9.4 Deney Numunelerinin Adlandırılması

Deney Numuneleri	Deney Numunelerinin Adı
Kaplamasız AISI 1045 Numunesi	TR-1
Takviyesiz Numune (Metco 350 NS)	TR-2
%5 Takviyeli Numune	TR-3
%10 Takviyeli Numune	TR-4
%15 Takviyeli Numune	TR-5

Daha sonra, bu altlık malzemelerinin yüzeyine kaplama tozlarının daha iyi tutunabilmesi için 60 grit' lik Al_2O_3 toz tanecikleri ile kumlama işlemi uygulanmış ve yüzeylerinin pürüzlendirilmesi gerçekleştirilmiştir (Şekil 9.5).



Şekil 9.5. Kumlanmış AISI 1045 malzemeleri ve kumlama cihazı

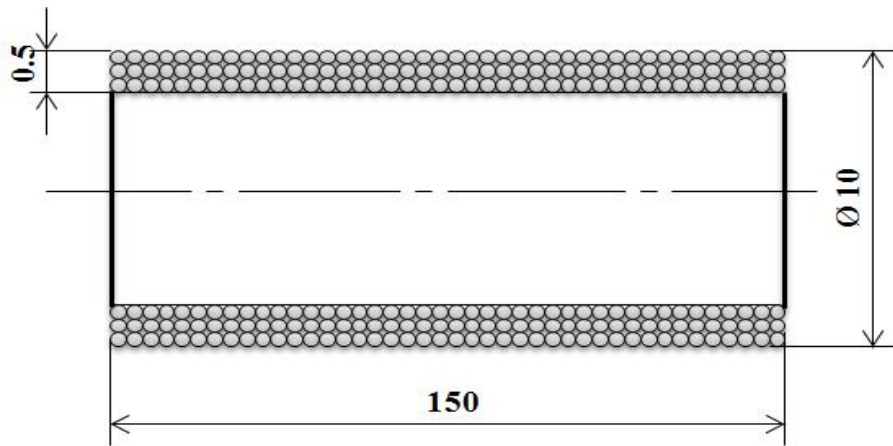
9.4. Kaplama İşleminin Uygulanması

Kaplama işlemleri, Prokap Makina Firmasının imkânları dâhilinde alevle püskürtme (Flame Spray) sistemi kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 9.6). Bu işlem uygulanırken Metco 6P püskürtme tabancası ve metal nozul kullanıldı. Püskürtme sisteminde kullanılan gazların basınçları sırasıyla asetilen 0.7, oksijen 4.1 ve hava ise 2 bar olacak şekilde ayarlandı.



Şekil 9.6. Alevle püskürtme tekniği ile gerçekleştirilen kaplama uygulamaları

Bu kaplama tekniği ile Tablo 9.4 te verilen her bir deney numunesi (TR-2, TR-3, TR-4 ve TR-5) takviyesiz ve takviyeli (mekanik alaşımlanmış) tozlar ile 0.5 mm kalınlığında kaplandı (Şekil 9.7).



Şekil 9.7. Deney numunesinin ölçüleri

Kaplama işlemlerinde kullanılan tozların püskürtülmesinde, püskürtme cihazının bağlı olduğu toz besleme cihazı MEC-PF3350 kodlu Hindistan malıdır. Cihazın toz besleme debisi ise 30 gr/dak olarak ayarlandı ve tüm kaplama işlemleri bu toz debisinde gerçekleştirildi. Deney numunelerinin devri, $10000 / (\text{malzeme çapı})$ formülüne [6] uygun bir şekilde belirlendi. Bu ifade kullanılarak deney numunelerinin devri $10000/9=1111,1111$ olarak hesaplandı. Ancak hesaplanan bu değer standart bir değer olmadığı için torna tezgahında bu değere en yakın devri olan 1250 dev/dak seçildi.

9.5. Kaplama Numunelerinin Yüzey Pürüzlülüklerinin Ölçülmesi

Kaplama yapılmış olan deney numunelerinin yüzey pürüzlülükleri, Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Mitutoyo marka SJ-201 tipi yüzey pürüzlülük cihazı ile ölçüldü (Şekil 9.8).



Şekil 9.8. Yüzey pürüzlülük ölçme cihazı (Mitutoyo SJ-201)

Her bir kaplama türünün yüzeyinde 5 farklı bölgeden ölçümler alındı ve daha sonra bu değerlerin ortalamasına göre Ra (ortalama yüzey pürüzlülüğü) değerleri belirlendi (Tablo 9.5). Tüm bu işlemlerde cihazın ölçüm aralığı 0,3 ve kurs boyu da 2,5 mm olarak seçildi.

Tablo 9.5. Deney Numunelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Değerleri

Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Numuneleri	Ra Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Değerleri (μm)
Kaplamasız AISI 1045 Numunesi	2,51
Takviyesiz Kaplama Numunesi	9,518
%5 Takviyeli Kaplama Numunesi	8,19
%10 Takviyeli Kaplama Numunesi	8,3
%15 Takviyeli Kaplama Numunesi	8,36

9.6. Kaplama Numunelerinin İncelenmeye Hazırlanması

Kaplama işlemleri tamamlanan deney numuneleri ilk önce $\varnothing 10$ mm x 10 mm boyutlarında kesildi. Bu numuneler, yüzey temizleme ve parlatma işlemi için Fırat Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan BUEHLER-SIMPLIMET 1000 cihazında bakalite alınmıştır (Şekil 9.9).



Şekil 9.9. Deney numunelerini bakalite alma cihazı

Bakalite alınan deney numuneleri ilk önce sırasıyla 80, 240, 400, 600, 800, 1200 mesh'lik zımpara ile zımparalandı ve daha sonra çuha ile parlatılmıştır.

9.7. Kaplama Numunelerinin Metalografik Yapı Analizi

Takviyeli, takviyesiz ve kaplamasız deney numunelerinin metalografik yapı analizleri Fırat Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan PME Olympus Tokyo marka mikroskopta yapıldı. Metalografik yapı analizlerinde, numunelere lokal büyütme uygulanarak kaplamaların ara yüzey, mikro yapı ve bunlara takviye oranlarının etkileri incelenmiştir.

9.8. Kaplama Numunelerinde Mikro Sertlik Analizlerinin Yapılması

Yine takviyeli, takviyesiz ve kaplamasız deney numunelerinin mikro sertlik ölçümlerini yapmak için Fırat Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Anton Pooer- Paar Pyhsica marka, MHT-10 tipi Vickers Mikro Sertlik ölçüm cihazı kullanıldı. Bu cihazda mikro sertlik ölçümleri yapılırken, deney numunelerine 8 saniye boyunca 20 gr' lık yük uygulanmıştır.

9.9. Deney Numunelerinin Adhesiv Aşınma Testleri

Bu tez çalışmasında, numunelerin adhesiv aşınma deneylerini yapabilmek için pnömatik tip bir aşınma test cihazı tasarlanmış ve imal edilmiştir (Şekil 9.10).

Bu deney düzeneğinde aşınma deneyleri blok-on-disk şeklinde gerçekleştirildi. Aşındırma diski olarak yüzey sertliği 61 HRC olan Ø80 mm x 40 mm boyutlarında DIN 1.2842 soğuk iş çeliği kullanılmıştır. Ayrıca aşınma sistemine adapte edilen ESİT marka yük hücresi (loadcell) ile deneyler süresince sürtünme kuvvetlerinin ölçümleri yapılmış ve yine sisteme bağlı olan ESİT marka data logger düzenleyici (Smart-P İndicator) ile gelen verilerin dönüşümü yapılarak bu değerler bir ara kablo vasıtasıyla anlık olarak bilgisayara aktarılmıştır.

Deney numunelerinin aşınma deneyleri, 2 kg, 4 kg ve 6 kg' lık yüklerde, 0,84 m/sn hızında (veya 200 dev/dak devir sayısında) ve 3000 metre aşınma mesafesinde yapılmıştır.

Deneylerde uygulanan yükler aşınma cihazı sisteminde yer alan kompresör kullanılarak pnömatik baskı kuvveti ile gerçekleşmiştir. Numunelerdeki aşınma kayıplarının ölçümleri ise her 300 metre de bir yapıldı. Bu ölçümlerde Fırat Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan 0,00001 hassasiyetindeki Precisa marka terazi kullanıldı. Her adhesiv aşınma deneyi için aşındırıcı disk yüzeyinin farklı bir bölümü kullanıldı. Her bir numune türü için ise 3 kez aşınma testi uygulanmıştır. Aşınma sonrası numunelerin aşınma yüzeylerinin fotoğrafları ise optik mikroskopta çekildi.



Şekil 9.10. Deneylerde kullanılan pnömatik tip aşınma cihazının elemanları

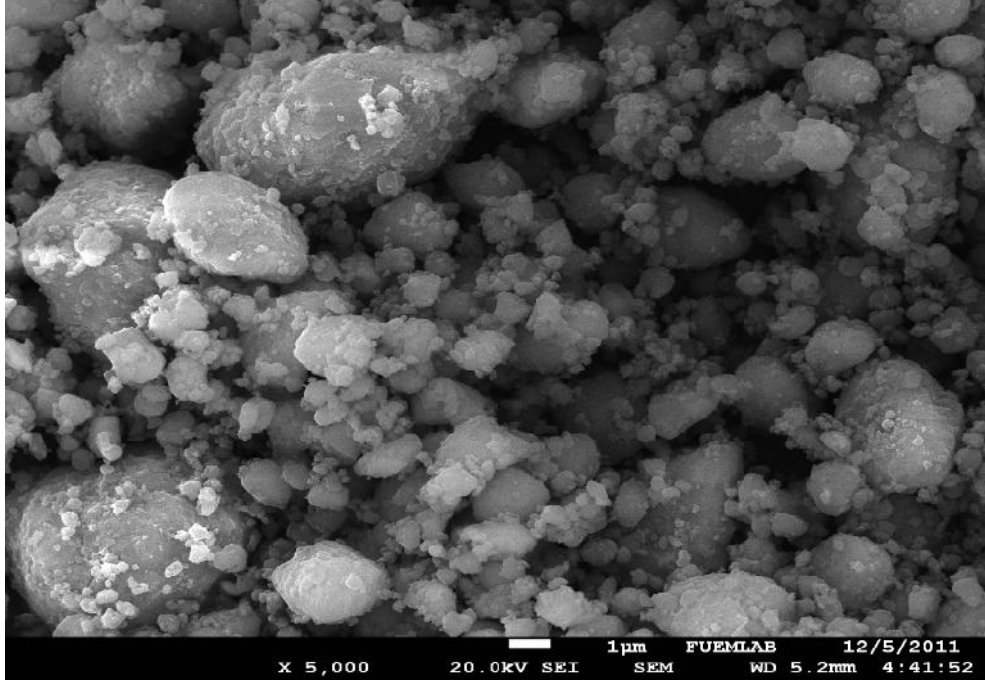
Şekil 9.10 de yer alan aşınma deney cihazının elemanları montaj numaralarına göre; 1- Adhesiv Aşındırıcı Disk (DIN 1.2842), 2- Pnömatik Piston (1-10 Kg Kapasiteli - Ø16), 3- İndicator (Data Logger), 4- Yük Hücresi (BB-100 tipi), 5- Elektrik Motoru (2.2 Kw), 6- UCP206 Kaymalı Rulman Yatakları, 7- Basınç Ayarlayıcısı, 8- Kayıt Bilgisayarı, 9- Kompresör, 10- İnvertör (Schenider ATV12-HU22M2- 2.2 Kw- 230 AC) gibi elemanlardan oluşmuştur.

10. DENEYSEL SONUÇLAR

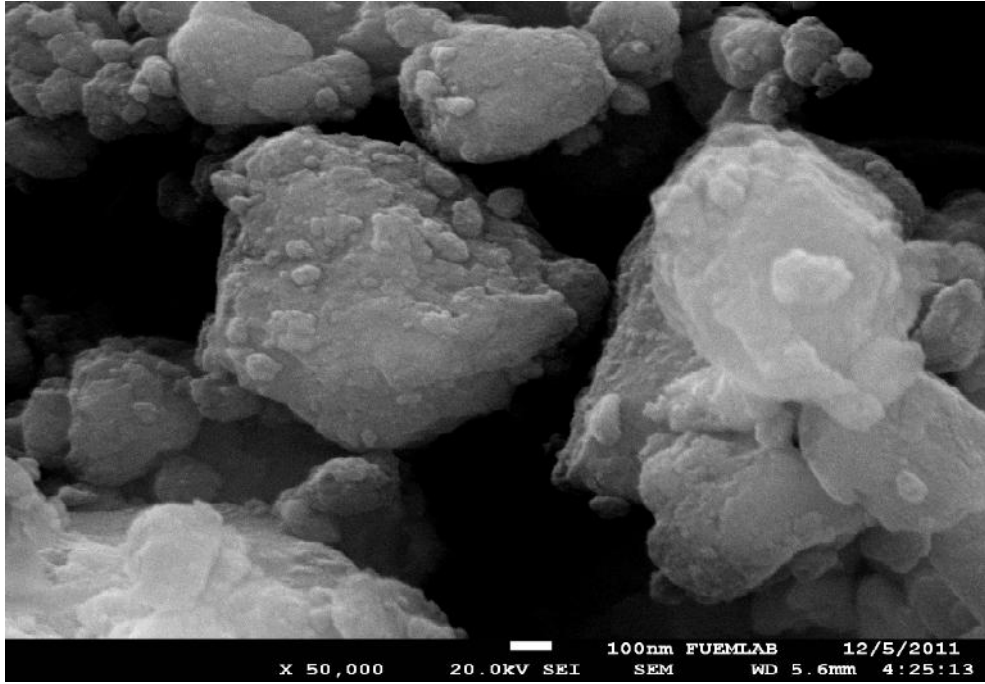
10.1. Mekanik Alaşımlanmış Tozların İncelenmesi

Takviye malzemesi iki farklı malzemenin mekanik alaşımlanmasından oluşmaktadır. Takviye malzemesine demir esaslı bir malzemenin ilave edilmesinin sebebi oluşturulacak yeni yüzeyde Al_2O_3 takviye tozları ile ana doku arasında kimyasal olarak bağ oluşturma hedefidir. Takviye tozlarının mekanik alaşımlanması sonrası SEM görüntülerinden de görüldüğü (Şekil 10.1-10.7) gibi alumina tozlarının içerisinde demir esaslı malzemenin difüze edildiği tahmin edilmektedir. Alınan EDS analizlerine (Şekil 10.8-10.10) ve XRD analizlerine göre (Şekil 10.11) göre yüzeyde alaşımlamanın başarılı olduğu kanaatine varılmıştır.

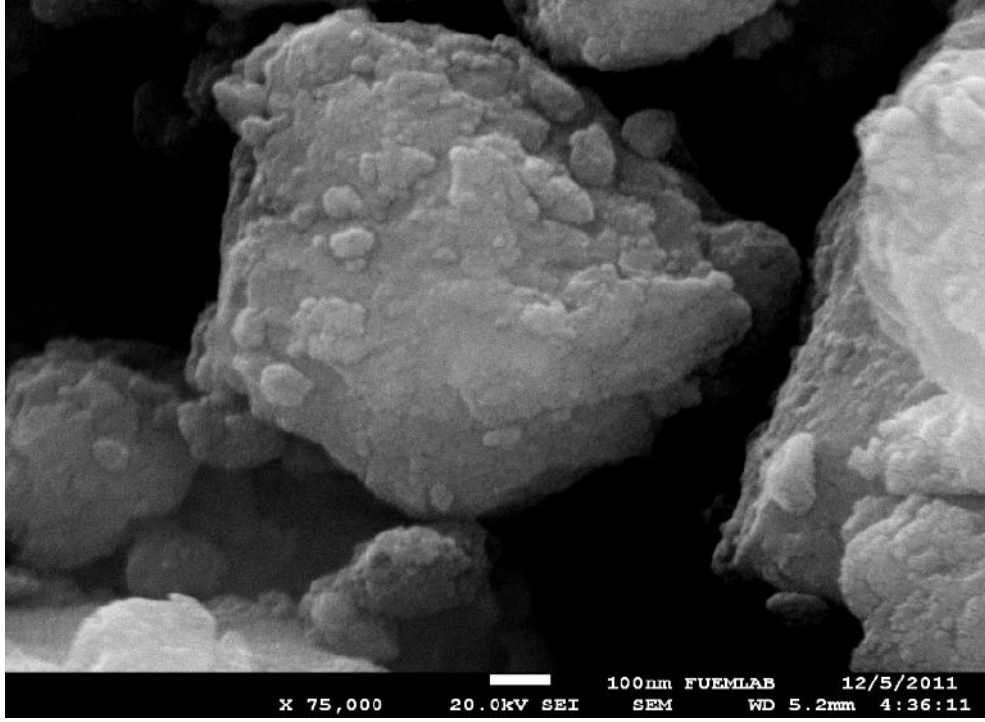
Yüzey kaplama için deneylerde üretilen takviye tozunun, mekanik alaşımlama işleminden sonra analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için Fırat Üniversitesi Fizik Laboratuvarlarında yer alan SEM cihazından analizleri sağlanılmıştır. Takviye tozlarının bileşik içeriğini Metco 350 NS (Fe 16Mo 2C 0.25Mn) %10 ve Metco 101 SF (Al_2O_3 3TiO₂) %90 olacak şekilde oluşturmaktadır. Mekanik alaşımlama işlemi 60 saat olarak icra edilmiştir. Mekanik alaşımlama sonrası elde edilen tozların SEM görüntüleri Şekil 10.1-10.7 de verilmiştir. SEM görüntüleri genel olarak incelendiğinde de M.A. sonrası partiküllerin homojen bir şekilde dağılım göstermediği, ancak katmanlı bir yapıya sahip olan bu alaşımdaki tozların içerisinde 29 nm' ye varan boyutlarda partiküllerin yer aldığı görülmüştür (Şekil 10.6).



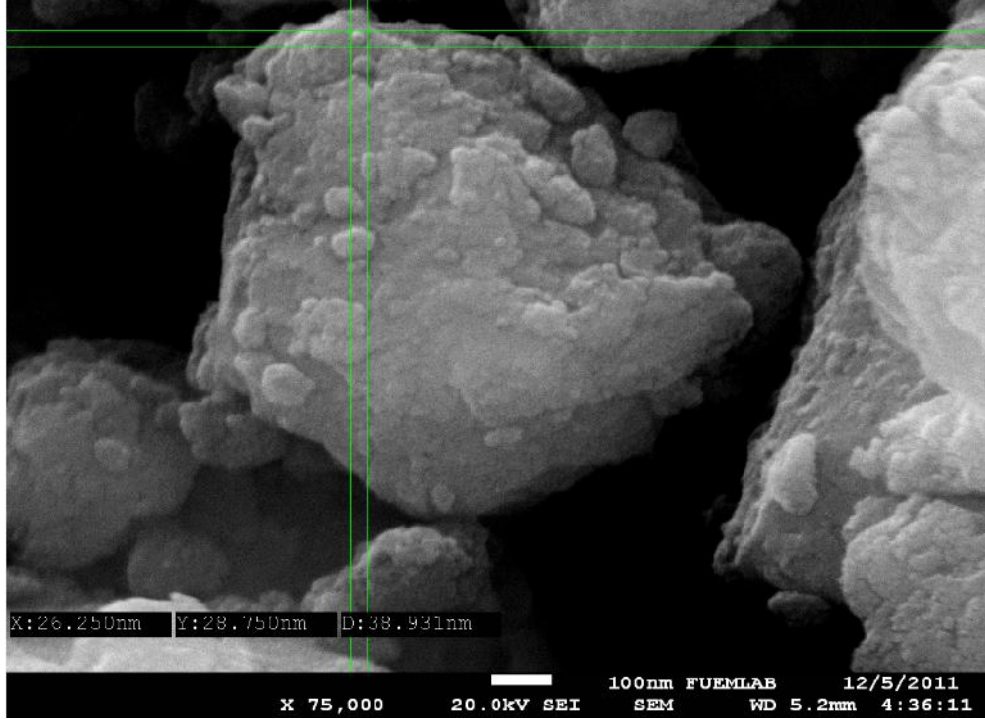
Şekil 10.1. Mekanik Alaşımlanmış M350 NS ve M101 SF tozlarının 5000 ölçekli SEM görüntüleri



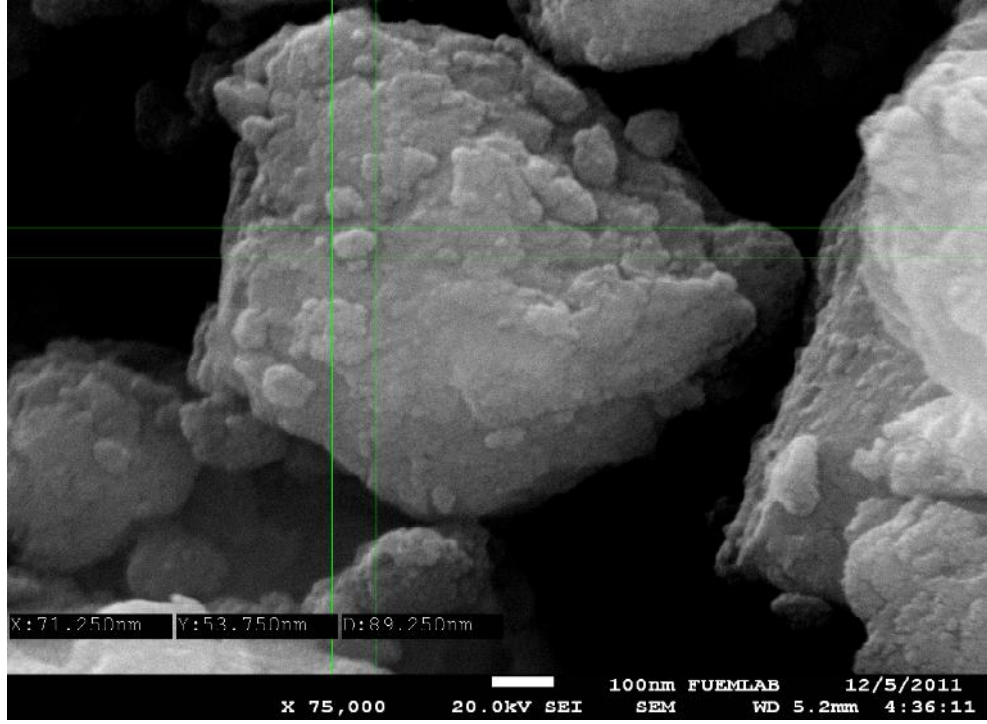
Şekil 10.2. Mekanik Alaşımlanmış M350 NS ve M101 SF tozlarının 50000 ölçekli SEM görüntüleri



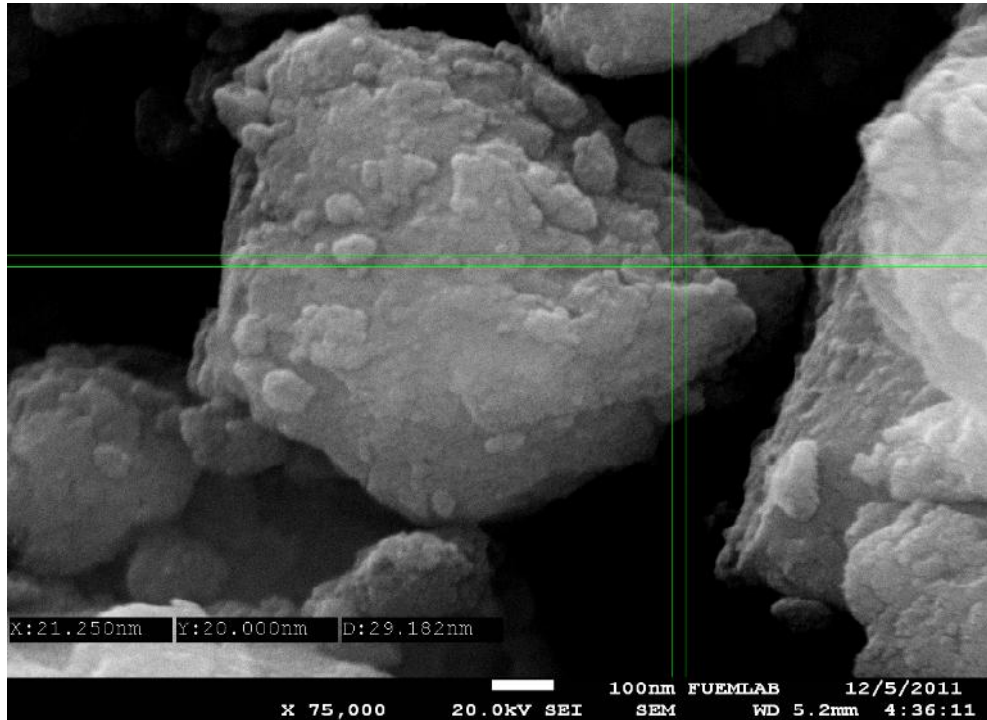
Şekil 10.3. Mekanik Alaşımlanmış M350 NS ve M101 SF tozlarının 75000 ölçekli SEM görüntüleri



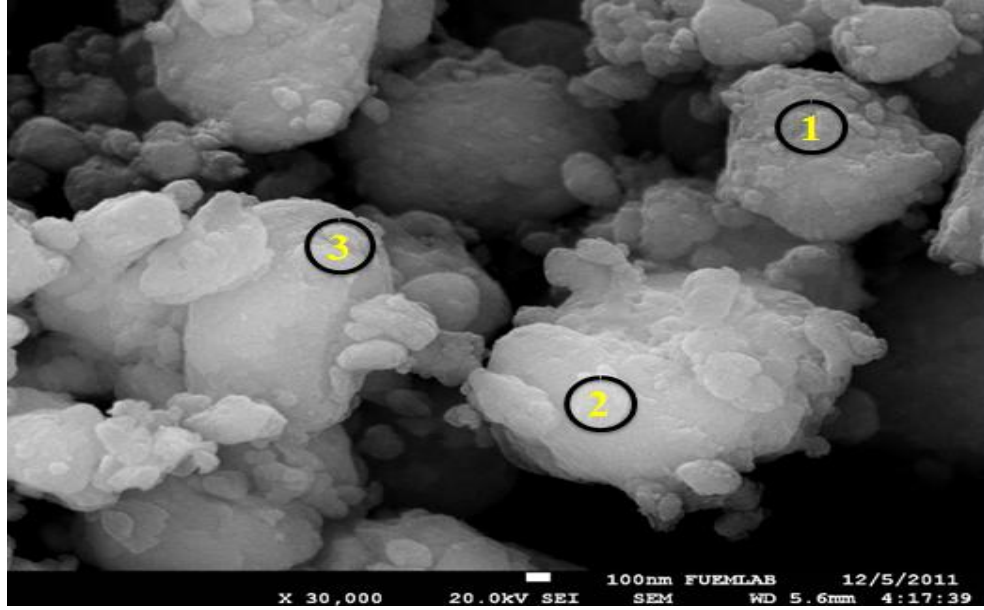
Şekil 10.4. Mekanik Alaşımlanmış M350 NS ve M101 SF tozlarının 75000 ölçekli SEM görüntülerinden alınan Boyut Ölçümü-1



Şekil 10.5. Mekanik Alaşımlanmış M350 NS ve M101 SF tozlarının 75000 ölçekli SEM görüntülerinden alınan Boyut Ölçümü-2

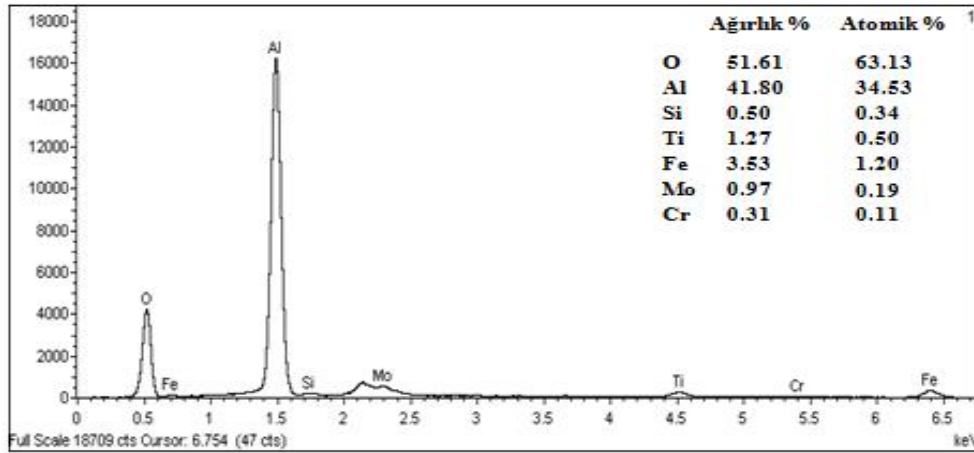


Şekil 10.6. Mekanik Alaşımlanmış M350 NS ve M101 SF tozlarının 75000 ölçekli SEM görüntülerinden alınan Boyut Ölçümü-3

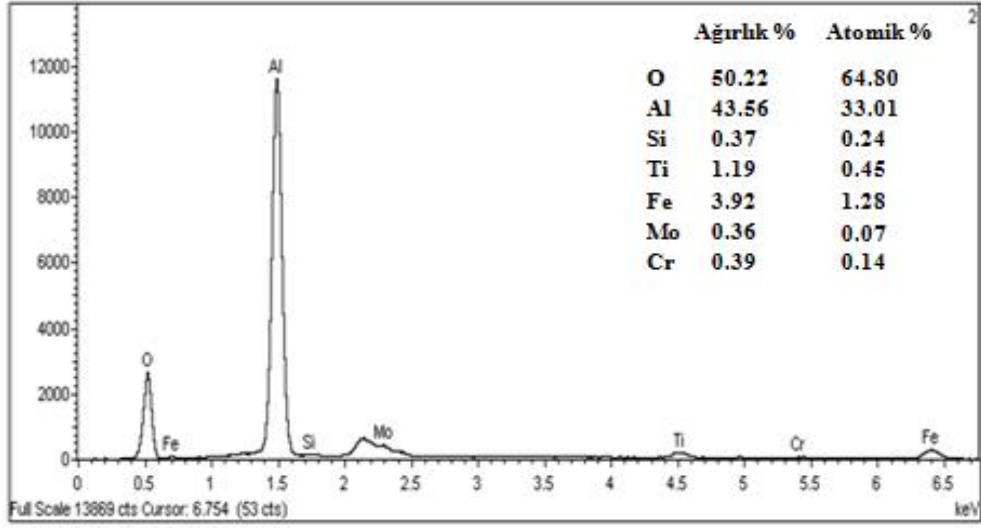


Şekil 10.7. Mekanik Alaşımlanmış M350 NS ve M101 SF tozlarının 30000 ölçekli SEM görüntülerinden alınan bölgesel EDX analizleri

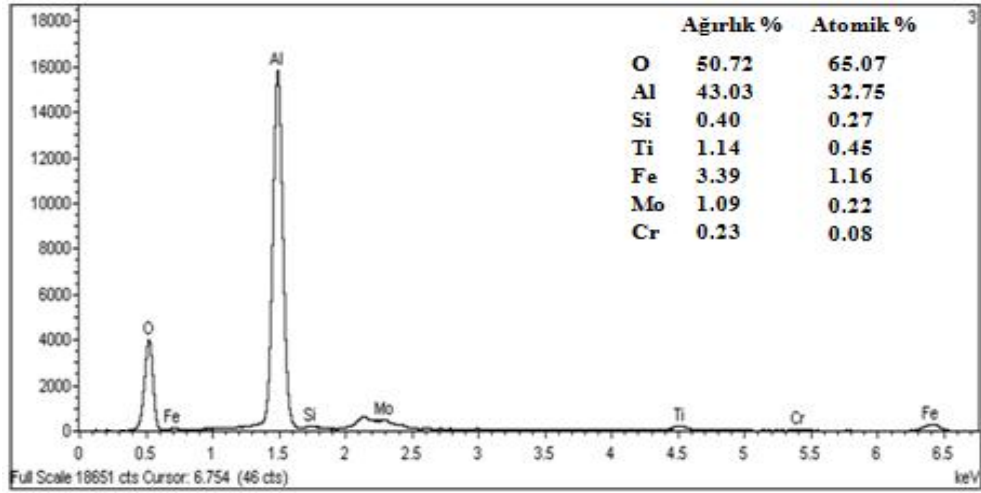
Şekil 10.7 de yer alan 30000X ölçekli SEM görüntüsünden alınan bölgesel EDX analizlerinin konumları görülmektedir. Bu bölgelerdeki EDX analizleri sırasıyla Şekil 10.8, Şekil 10.9 ve Şekil 10.10 da verilmiştir. Bu EDX analizlerinde mekanik alaşımlamada yer alan malzemelerin içindeki kimyasal konsantrasyon ağırlıkça % ve atomca % olarak belirlenmiştir.



Şekil 10.8. M.A. 30000 ölçekli SEM görüntüsünden 1 numaralı bölgenin EDX verileri

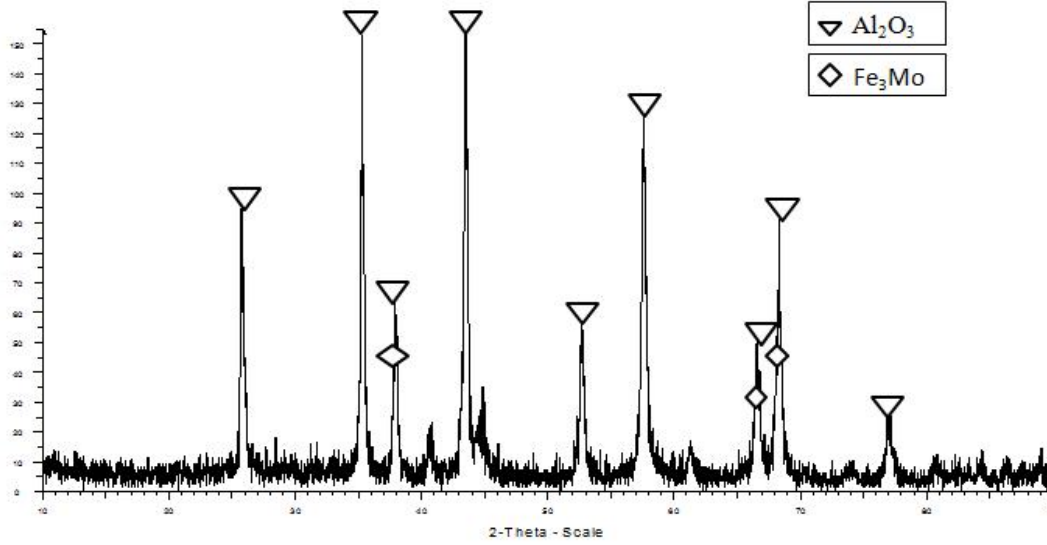


Şekil 10.9. M.A. 30000 ölçekli SEM görüntüsünden 2 numaralı bölgenin EDX verileri



Şekil 10.10. M.A. 30000 ölçekli SEM görüntüsünden 3 numaralı bölgenin EDX verileri

Şekil 10.11 de mekanik alaşımlanmış takviye tozunun XRD den alınılmış analizi yer almaktadır. XRD analizine göre yapıda yoğun olarak Al_2O_3 fazının bulunduğu tespit edilmiştir. Yapıya %10 olarak ilave edilmiş olan Metco 350 NS tozlarındaki Fe ve Mo EDS analizlerinden de belirlenmiştir. XRD sonuçlarında yapıda ayrıca Fe_3Mo bileşiğinin olduğu da belirlenmiştir.



Şekil 10.11. M.A. toz numunesinden alınan XRD görüntüsü

Tozların içindeki kristal ebatlarının XRD sonuçlarına göre belirlemek için 10.1 nolu eşitlik kullanılmıştır [88].

$$t_k = \frac{0.9\lambda c}{\cos\theta x B} \times \frac{180}{\pi} (nm) \quad (10.1)$$

t_k : Kristal Boyutu (nm)

λ_c : Cihazın Bakır tüp ışın dalga boyu

θ : Malzemenin XRD deki sapma açısı

B : Pikin yarı yükseklikteki genişliği

Şekil 10.11 den yararlanılarak, denklem 10.1 de yer alan formüle [88] bilinen değerler konularak mekanik alaşımlama sonucu Al_2O_3 takviyesinin kristal boyutu hesaplanılmıştır. Hesaplanan bu değer tablo 10.1 de verilmiştir. Ayrıca takviye tozu içinde yer alan

demir esaslı molibden kompozit tozunun da oluşturduğu Fe₃Mo fazının da kristal boyutu hesaplanarak tablo 10.2 de verilmiştir. Cihazın ışın dalga boyu sabit olup, λ_c ' nin değeri 1.5406 dir.

Tablo 10.1. Al₂O₃ XRD Hesaplama ve Kristal Boyutu Değerleri

$2\theta_1$	35.271	B ₁	0.266	t _{k1}	314.32 nm
$2\theta_2$	43.459	B ₂	0.292	t _{k2}	292.54 nm
$2\theta_3$	57.599	B ₃	0.375	t _{k3}	240.73 nm

Tablo 10.2. Fe₃Mo XRD Hesaplama ve Kristal Boyutu Değerleri

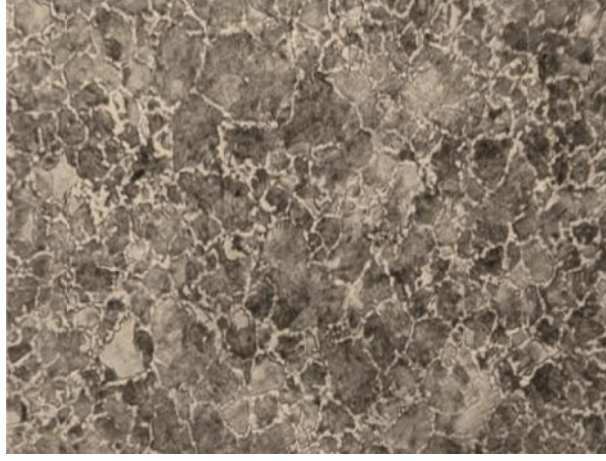
$2\theta_1$	37.288	B ₁	0.314	t _{k1}	267.15 nm
$2\theta_2$	66.591	B ₂	0.332	t _{k2}	286.42 nm
$2\theta_3$	68.3	B ₃	0.302	t _{k3}	318.02 nm

10.2. Deney Numunelerinin Metalografik Yapı Analiz Sonuçları

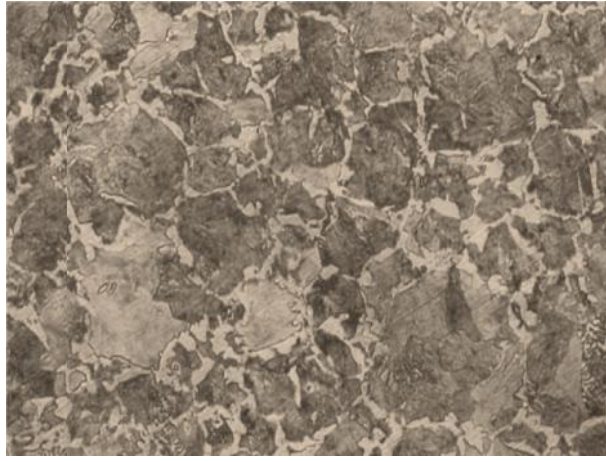
Deney numunelerinin metalografik yapı yani mikro yapı analizlerinde, AISI 1045 malzemesi yüzeyine yapılan dört farklı kaplama işlemi ile elde edilen kaplama numunelerinden alınan sırasıyla 75X, 150X ve 300X ölçekli optik görüntüleri Şekil 10.12-Şekil 10.16 arasında yer almaktadır.

Genel olarak kaplamalı numunelerin optik görüntüleri incelendiğinde yüzey üzerinde kısmen porozite varlığına rastlanılmıştır. Öyle ki bu durum zaten alevle püskürtme tekniğinden kaynaklı olarak ortaya çıkması olağan bir durumdur. Ayrıca kaplamalara yapılan takviye oranı için de mekanik alaşımlama sırasında sürenin uzun olmasından dolayı tozda doğal olarak kirlenme sorunlarının artış gösterdiği ve bununla porozite oranını artırdığı literatürdeki sonuçlarla da [9], [89] uygunluk göstermiştir.

Ayrıca görüntüler dikkatli olarak incelendiğinde, nano yapıya sahip olan takviyeli tozlarla gerçekleştirilen kaplamaların, takviye oranı arttıkça yani nano yapıya sahip toz oranı arttıkça porozite oranının daha da azaldığı görülmüştür. Bunu da öğütücüde elde edilen nano yapı tozların birbirleri ile atomik seviyedeki oluşturdıkları gerilmelerin mikro yapıdaki tozların durumuna göre daha fazla artış göstermesinden kaynaklı olduğu literatürdeki çalışmaya [15] eş güdümlü olarak görülmektedir.



a) 75X

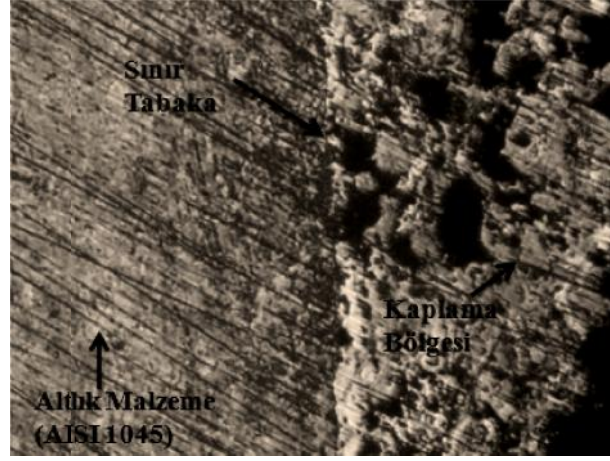


b) 150X



c) 300X

Şekil 10.12. TR-1 Numunesinin optik mikroskop fotoğrafları



a) 75X

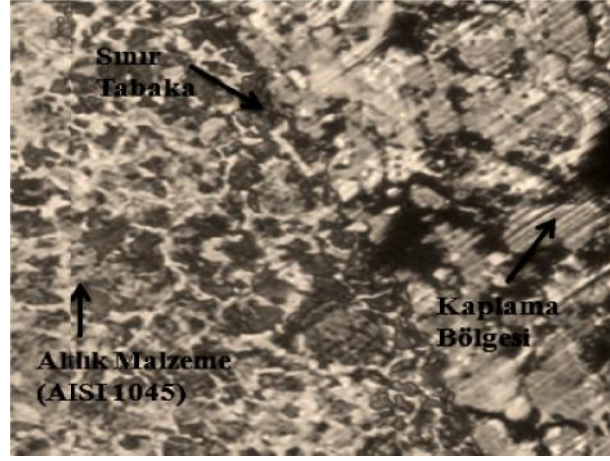


b) 150X

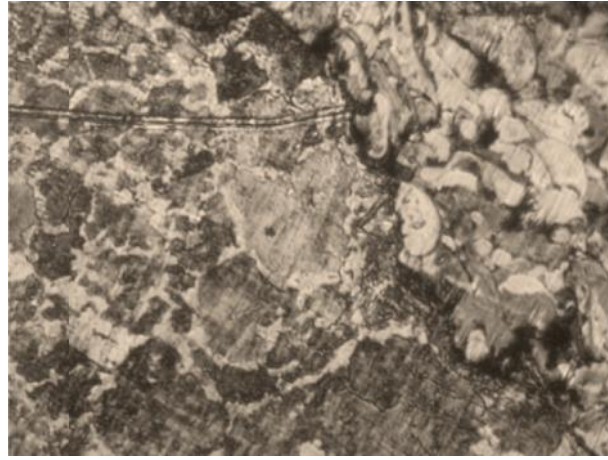


c) 300X

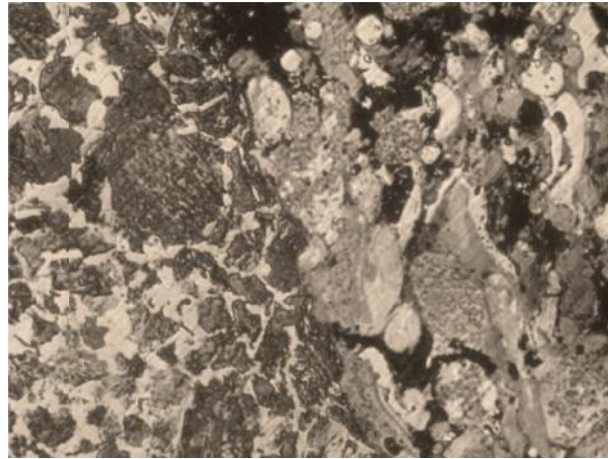
Şekil 10.13.TR-2 numunesinin optik mikroskop fotoğrafları



a) 75X



b) 150X

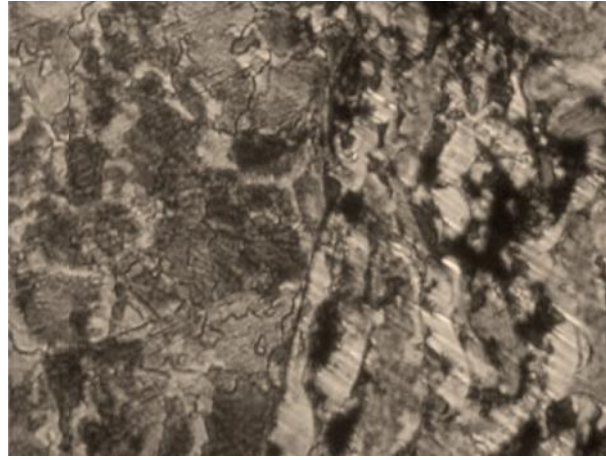


c) 300X

Şekil 10.14. TR-3 numunesinin optik mikroskop fotoğrafları



a) 75X

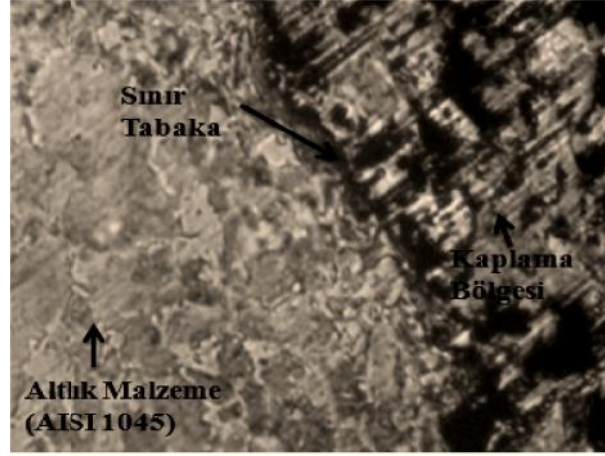


b) 150X

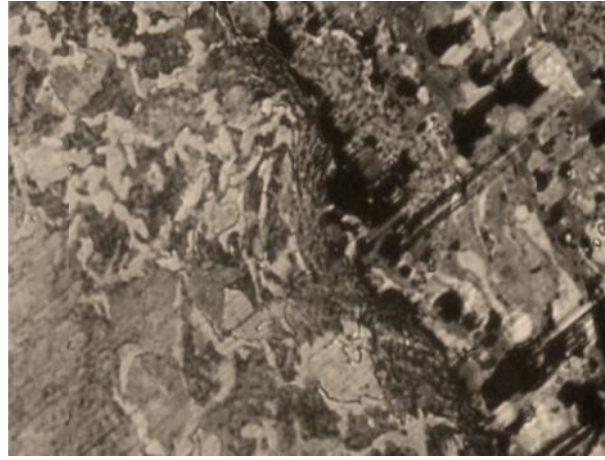


c) 300X

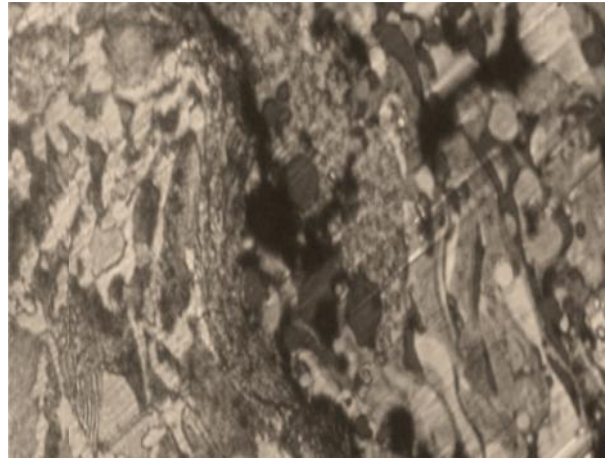
Şekil 10.15. TR-4 numunesinin optik mikroskop fotoğrafları



a) 75X



b) 150X

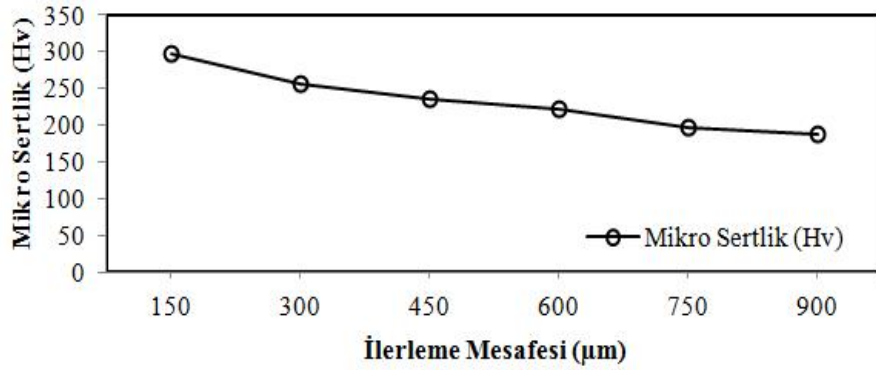


c) 300X

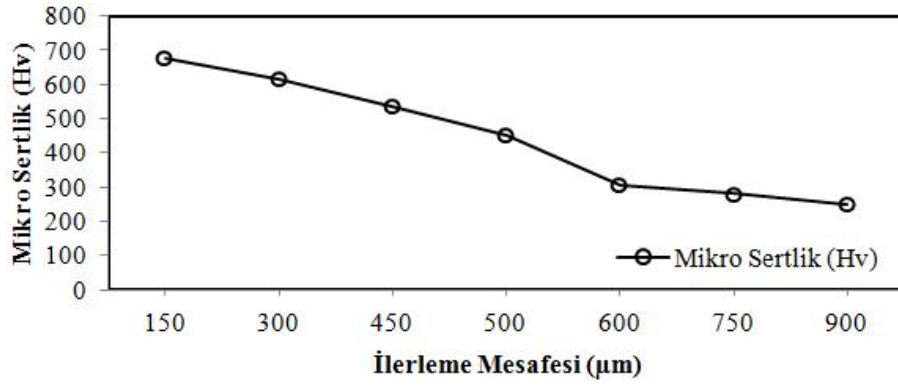
Şekil 10.16. TR-5 numunesinin optik mikroskop fotoğrafları

10.3. Mikro Sertlik Deney Sonuçları

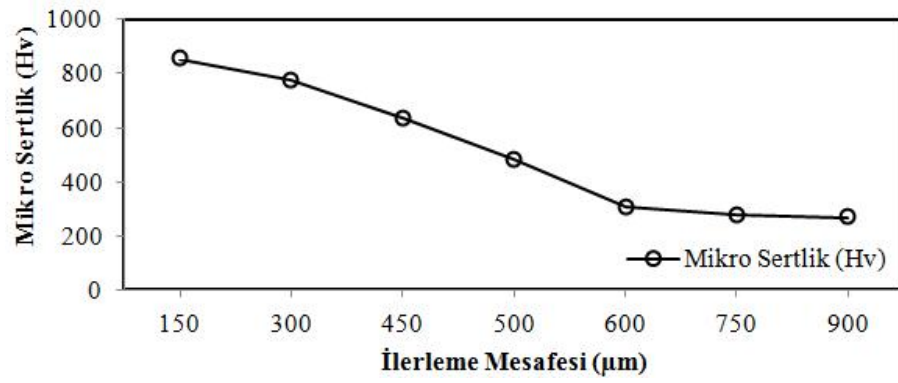
Kaplamalı ve kaplamasız numunelerin yüzeyinden alınan Vickers sertlik değerleri aşağıda yer alan şekil 10.17 - şekil 10.22 arasındaki grafiklerde sunulmuştur. Sertlik ölçülerindeki hedef, malzeme bileşimine bağlı olarak, özellikle kaplamanın sertliğe etkisinin belirlenmesi ve sertlik ile aşınma dayanımı arasındaki ilişkinin ortaya çıkarılmasını sağlamaktır. Yapılan sertlik ölçümlerinde kaplamalı ve kaplamasız numunelerin yüzeyinden merkeze doğru 150 μm ilerleme mesafesi adımlarıyla ölçümler alınmıştır. Kaplamalı numunelerde ise özellikle geçiş bölgesine dikkat edilmiştir. Elde edilen grafiklere göre kaplamalı numunelerin altlık malzeme olan AISI 1045 malzemesine göre çok daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu apaçık ortadadır. Deneylerde bir diğer dikkat çeken durumun ise mekanik alaşımlama yapılarak takviye oluşturulmuş kaplamaların hem takviyesiz kaplamaya hem de kaplamasız olan AISI 1045 malzemelerine göre çok daha fazla sertlik değerlerine sahip olduğu saptanmıştır. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere partikül takviye oranının ağırlıkça yüzdesinin artmasıyla kaplama malzemelerinin sertliği de artmıştır. Bu durumun takviye malzemesi içerisinde yer alan Al_2O_3 partiküllerinin sertliğinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Öyle ki bu durumun literatürle de [12], [20], [29], [89], [90] paralellik gösterdiği nettir.



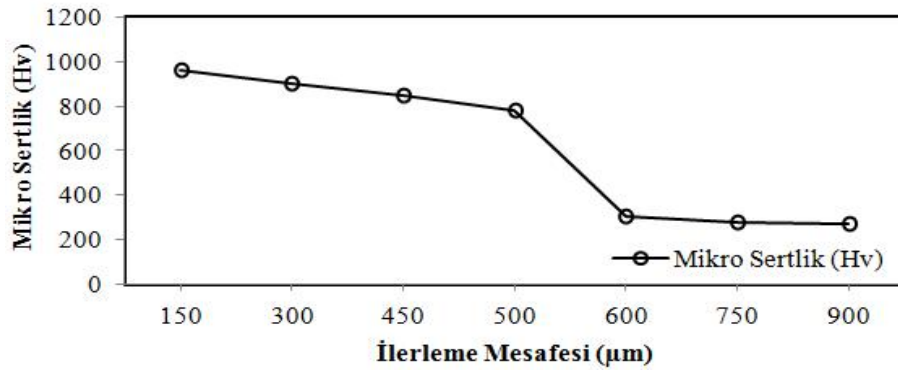
Şekil 10.17. TR-1 Numunesinin mikro sertlik değerleri



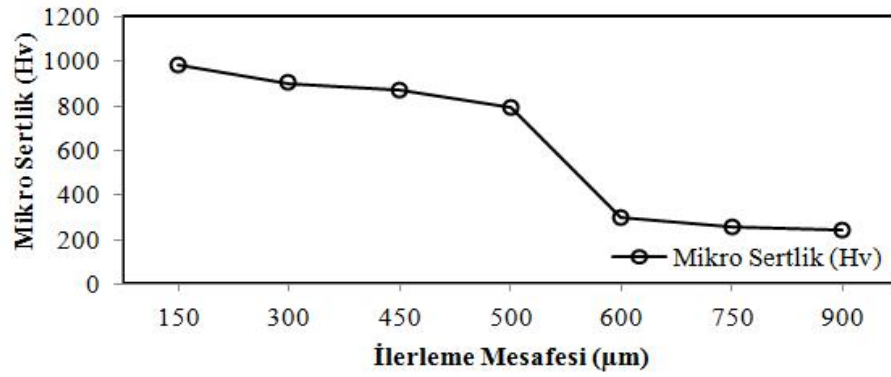
Şekil 10.18. TR-2 Numunesinin mikro sertlik değerleri



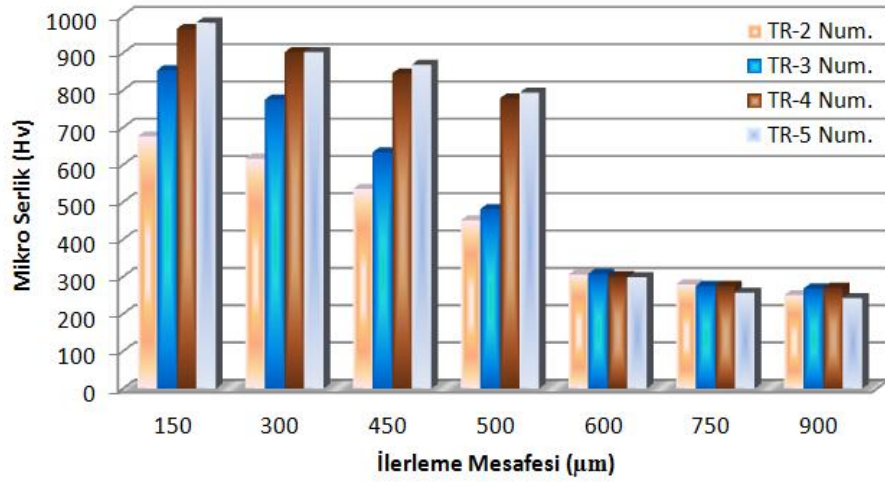
Şekil 10.19. TR-3 Numunesinin mikro sertlik değerleri



Şekil 10.20. TR-4 Numunesinin mikro sertlik değerleri



Şekil 10.21. TR-5 Numunesinin mikro sertlik değerleri



Şekil 10.22. Kaplamalı numunelerin karşılaştırmalı mikro sertlik değerleri

Yukarıdaki şekillerde yer alan grafiklerden de anlaşılacağı üzere kaplamalı numunelerde geçiş bölgelerinin olduğu kısımlar kaplama tabakasının malzemenin yarıçapta 500 mikron kaplama kalınlığına sahip olmalarından dolayı bu bölgelerde, genel olarak 150 mikron da bir alınan ölçüme ek olarak yüzeyden merkeze doğru 500 mikronun kesiştiği bölge olan geçiş bölgesinden de sertlik değeri ölçümleri alınmıştır. En yüksek sertlik değerine sahip numune TR-5 kod numaralı olan % 15 takviyeli numunenin dış yüzeyden merkeze doğru 150 mikron mesafedeki ölçümde 981.6 HV sertlik değerinde olduğu tespit edilmiştir.

TR-2 numunesi yani takviyesiz ve herhangi bir işlem görmemiş olan Metco 350 NS tozlarıyla yapılan kaplamadan alınan sertlik değerlerinin de Sulzer Metco firmasının teknik bültenindeki [85], sertlik değerleri (600-700 HV) arasında olduğu görülmüştür.

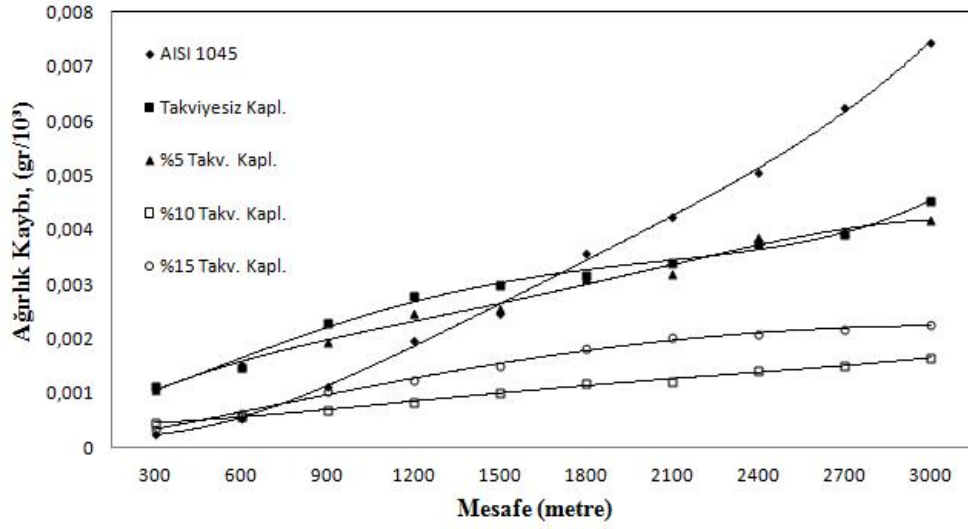
10.4. Deney Numunelerinin Adhesiv Aşınma Deney Sonuçları

Yapılan kaplama işlemlerinde değişken parametre olarak dört farklı kaplama türünün (takviyesiz, %5 takviyeli, %10 takviyeli, %15 takviyeli) ve 3 farklı yük altında (2 kg, 4 kg, 6kg) sabit hız koşulları 200 dev/dk (0,84 m/sn) altında 3000 metre yol mesafesine bağlı olarak adhesiv aşınma testi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney verilerinin elde edilmesinde adhesiv aşınma tipi uygulanmış olan numunelerin ağırlık kayıpları deney öncesi, devamı (Her 300 metre de bir) ve sonunda 0.00001 gram hassasiyetine duyarlı olan terazide tartılmıştır. Elde edilen değerlerde toplam aşınma kaybının ölçümleri hesaplanılarak aşağıda yer alan (Şekil 10.23-Şekil 10.30) grafiklerde sunulmuştur.

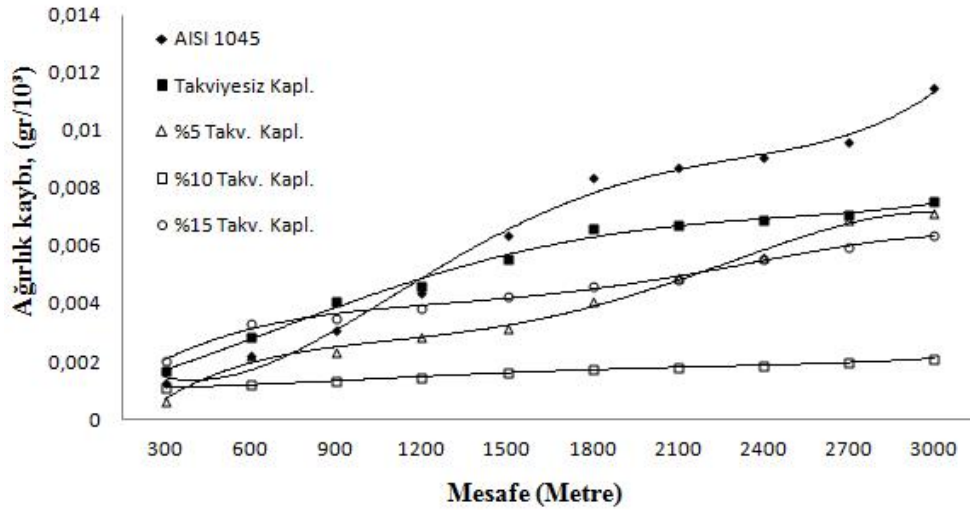
Toplam aşınma kayıpları incelendiğinde, tüm şartlar altında kaplamalı numunelerin kaplamasız AISI 1045 malzemesine göre daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca artan yüke bağlı olarak numunelerde aşınma kaybının da artış gösterdiği görülmektedir (Şekil10.23-10.25).

Yapılan deneyler neticesinde aşınma kayıplarının sonuçları incelenerek, kaplamalı AISI 1045 numunelerinin kaplamasız AISI 1045 numunelerine göre aşınmaya daha dirençli olduğu saptanmıştır. Herhangi bir şekilde mekanik olarak işlem yapılmaksızın var olan ticari tozlara, belirlenen oranlarda takviye yapılan kaplamalar arasında en iyi aşınma direncini %10 takviyeli kaplama sağlamıştır. Bu durumu malzemelerden alınan sertlik değerleriyle de ([12, 23, 26, 27, 34, 35,89]) paralel olduğu net olarak görülmektedir.

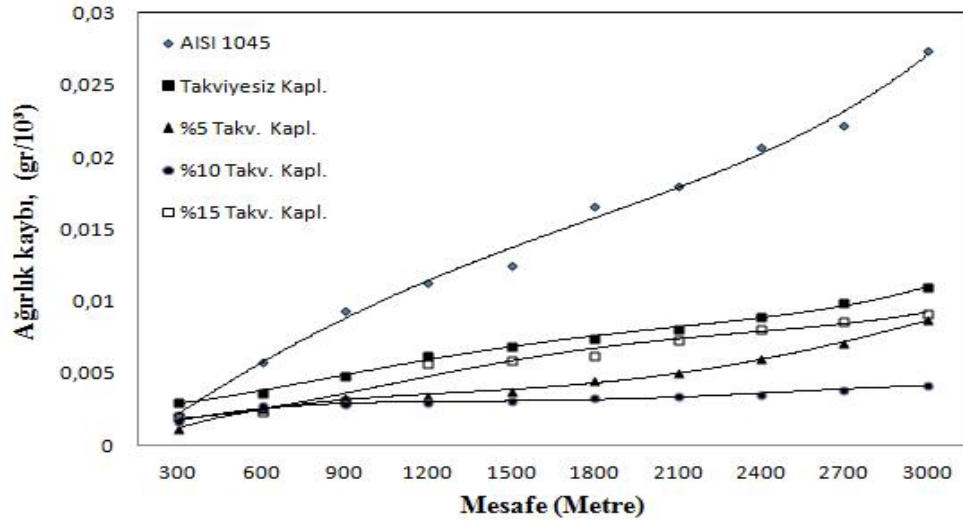
Kaplamalı numuneler kendi aralarında mukayese edildiğinde takviyesiz kaplamaların yer aldığı TR-2 numunelerinin (Şekil10.27) kayma mesafesi ve yüke bağlı olarak elde edilen aşınma grafikleri de incelendiğinde takviyeli kaplamalara göre (Şekil 10.28-10.30) ağırlık kaybının daha fazla olduğu görülmüştür.



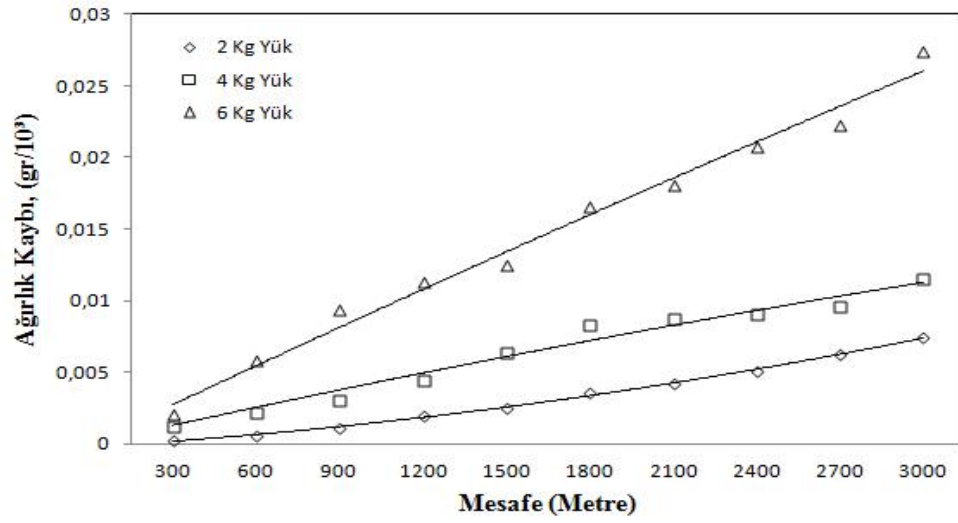
Şekil 10.23. 2 Kg'lık yüke bağlı numunelerin aşınma miktarlarının kayma mesafesi ile değişiminin karşılaştırılması



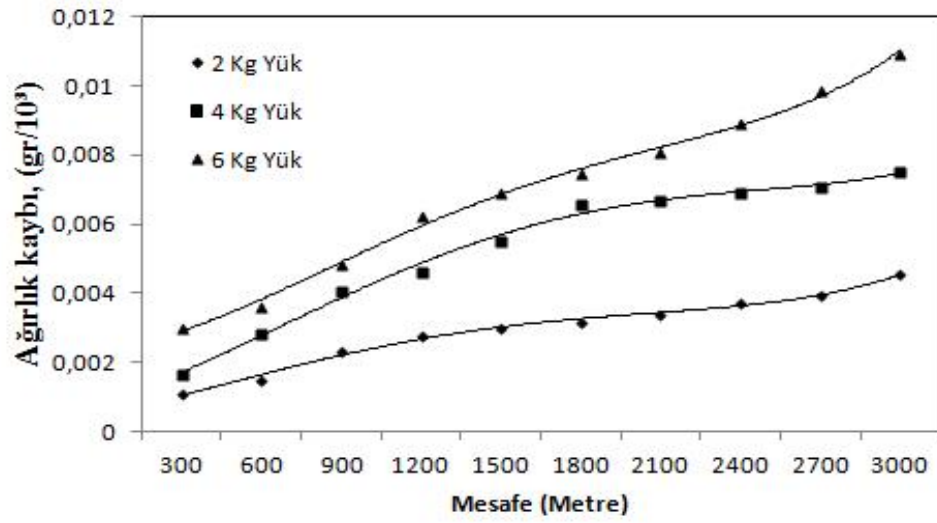
Şekil 10.24. 4 Kg'lık yüke bağlı numunelerin aşınma miktarlarının kayma mesafesi ile değişiminin karşılaştırılması



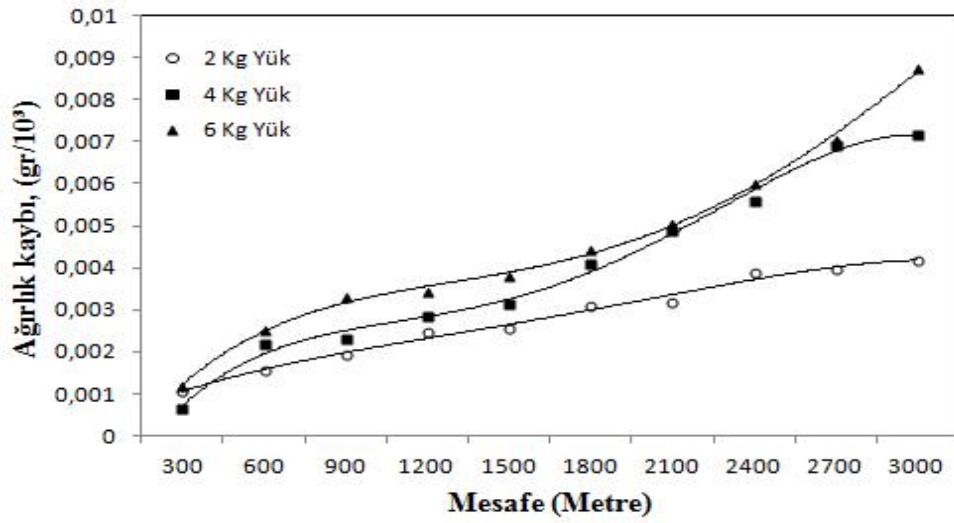
Şekil 10.25. 6 Kg'lık yüke bağlı numunelerin aşınma miktarlarının kayma mesafesi ile değişiminin karşılaştırılması



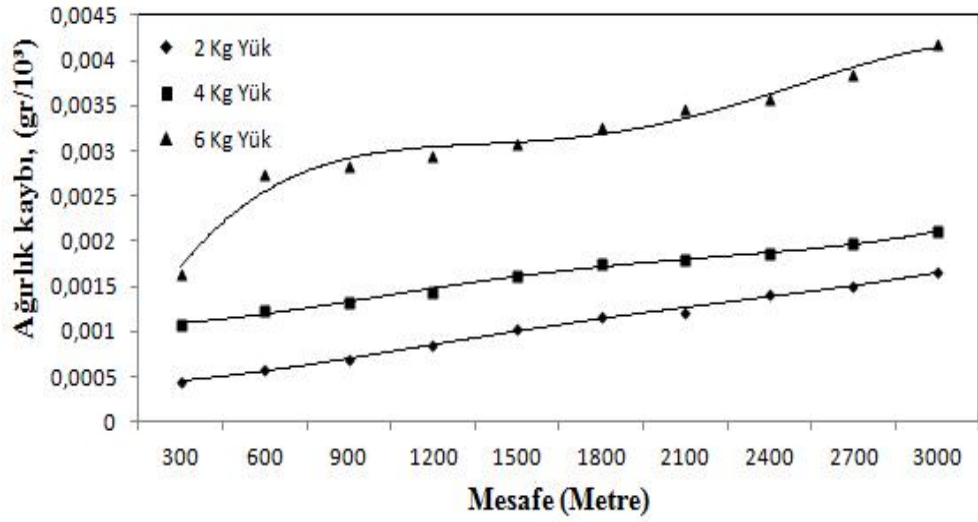
Şekil 10.26. Kaplamasız AISI 1045 numunelerin aşınma miktarlarının yük ve kayma mesafesine bağlı değişimin karşılaştırılması



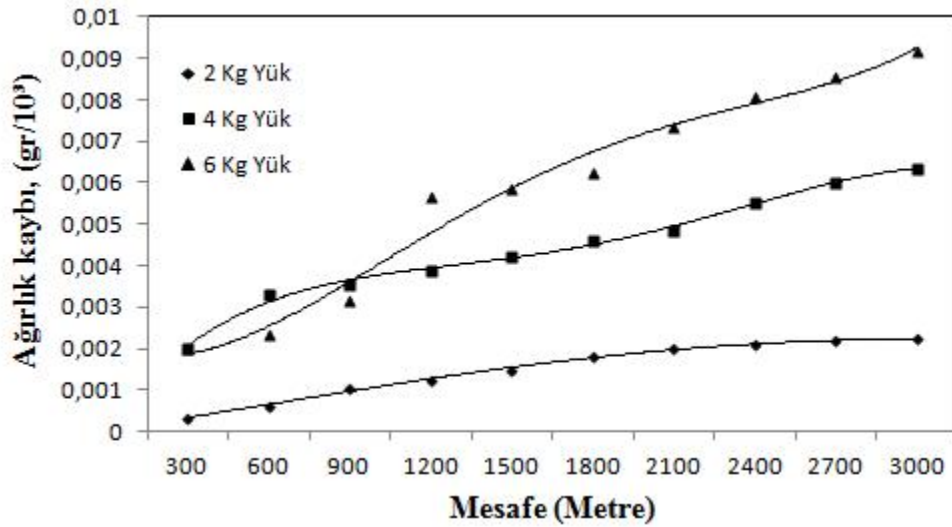
Şekil 10.27. Takviyesiz kaplamalı numunelerin aşınma miktarlarının yük ve kayma mesafesine bağlı değişimin karşılaştırılması



Şekil 10.28. %5 Takviye kaplamalı numunelerin aşınma miktarlarının yük ve kayma mesafesine bağlı değişimin karşılaştırılması



Şekil 10.29. %10 Takviye kaplamalı numunelerin aşınma miktarlarının yük ve kayma mesafesine bağlı değişimin karşılaştırılması

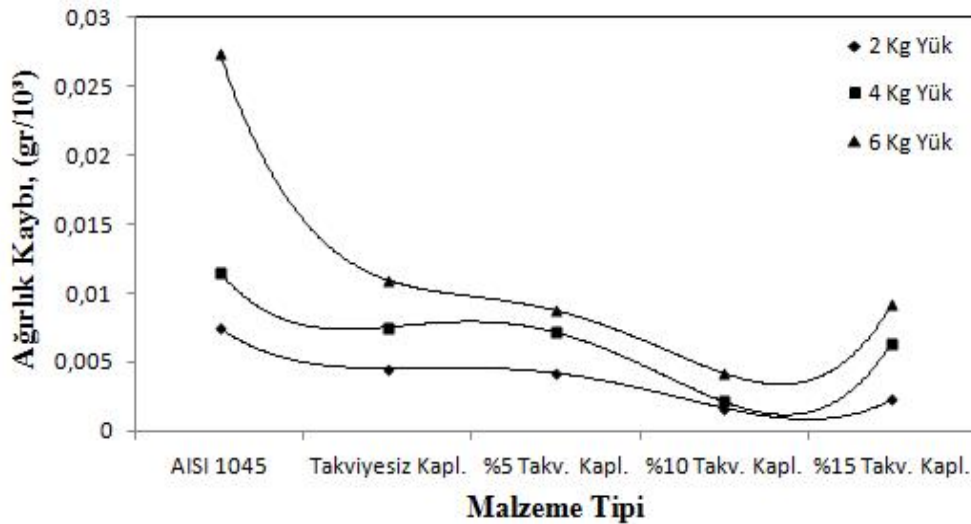


Şekil 10.30. %15 Takviye kaplamalı numunelerin aşınma miktarlarının yük ve kayma mesafesine bağlı değişimin karşılaştırılması

Deneylerden çıkarılacak bir sonuçta, kaplamalı numunelerde yapılan takviye oranı arttıkça bütün takviyeli numuneler için aşınma direnci aynı paralellikte olmamıştır. Fakat sertlikleri incelendiğinde %15 takviyeli numunelerin en yüksek mikro sertliğe sahip olduğu

görülmektedir. Öyleyse bu durumu açıklayabilecek en mantıklı sebebin, kaplama ana tozuna yapılan takviyenin %15 takviyeli numune için aşınma yüzeylerinde homojen bir şekilde dağılmadığı düşünülmüştür. Böyle bir durumunda karşımıza şöyle bir sonucu çıkardığı görülmektedir. Kaplama ana toz malzemesine yapılan takviye oranında bir sınır takviye oranının [26] olduğu görülmüştür. Yani yapılan takviye oranının %10 takviyeden sonra istenilen aşınma direncine eşlik edemediği anlaşılmıştır.

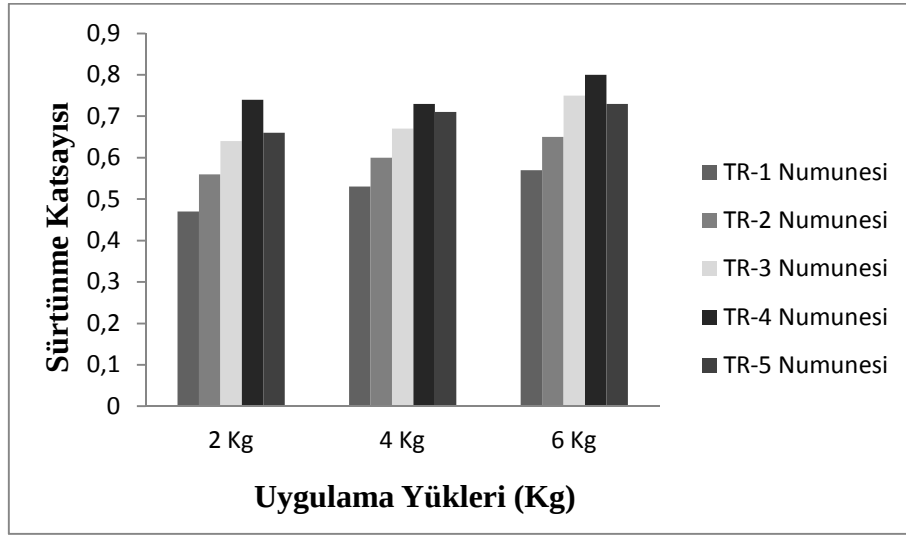
Şekil 10.31, deneylerdeki aşınma yolu olan 3000 metre deki son değerler alınarak, deneylerde kullanılan farklı numunelerin yüke bağlı olarak değişimini göstermektedir. Grafik incelendiğinde, yük artıkça buna bağlı aşınma miktarının da artış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, aşınma verilerine bakıldığında da, takviye ilavesi sonrası sınır takviye ilavesinin %10 olduğu net olarak anlaşılmaktadır. Bu değer üzerine çıkıldığında aşınma oranında artışın sebebinin mekanik alaşımlama ile elde edilen matris ile takviye arasındaki bağın yetersiz olduğu kanaatine varılmıştır. Bu çalışmada takviye içindeki matris tozu oranı sabit tutulmuştur. Muhtemelen takviye içindeki demir esaslı bağlayıcı görevi gören tozun miktarında değişiklik yapılması halinde takviye oranındaki optimum değerlerde de değişim görülebilir. Bu çalışmanın devamında takviye içindeki bağlayıcı toz oranındaki değişim gibi mekanik alaşımlama parametreleri (süre, bilye oranı, sıcaklık) çalışılmalıdır.



Şekil 10.31. Deney numunelerinin yüke bağlı genel değişimi

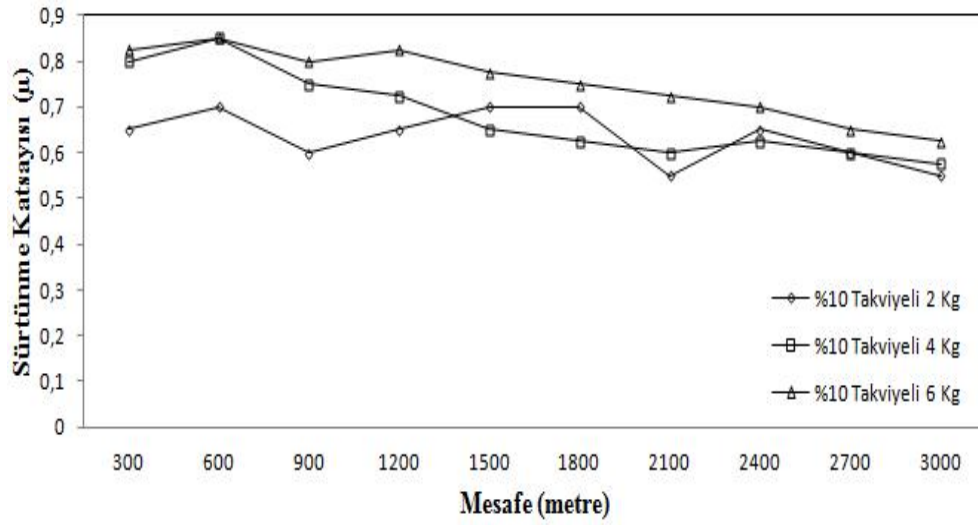
10.4.1. Aşınma Deney Numunelerinin Sürtünme Katsayıları

Deneylerde anlık olarak (240 Anlık veri / Dakika) alınan sürtünme kuvveti değerlerinin normal kuvvete oranı ile sürtünme katsayıları bulunmuştur. Ardından anlık ölçümlere bağlı sürtünme katsayı değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak uygulama yüklerine bağlı grafikleri çizilmiştir. Şekil 10.32 da hesaplanan sürtünme katsayılarının, uygulama yüklerine bağlı değişimlerini gösteren grafik görülmektedir.



Şekil 10.32. Deney yüklerine bağlı olarak aşınma numunelerinin sürtünme katsayılarının değişimi

Şekil 10.33 de aşınma deneylerinde en dirençli olan %10 takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı grafiği görülmektedir. Grafik, deneylerde uygulanan değişken yüklere göre sürtünme katsayısının yola bağlı değişimini belirtmektedir. Grafik incelendiğinde, sürtünme katsayısının yola bağlı mesafe arttıkça düşüş gösterdiğine görülmektedir.

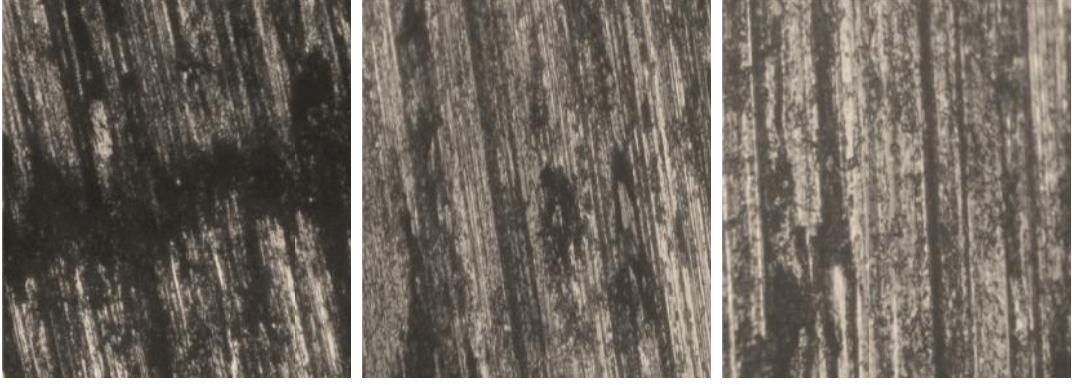


Şekil 10.33. %10 Takviyeli değişken yüklerde sürtünme katsayısının yola bağlı değişimi

10.4.2. Aşınma Deney Numunelerinin Optik Görüntüleri

Genel olarak aşınma deneyleri sonunda bütün aşınma numunelerinin optik mikroskopta 75X, 150X ve 300X ölçeklerde görüntüleri alınmıştır.

Şekil 10.34, 10.35 ve 10.36 da kaplamasız AISI 1045 numunelerinin sırasıyla 2, 4 ve 6 kg yüklerde 3000 metre aşınmış yüzeylerinin 75X, 150X ve 300X ölçeklerinde çekilmiş optik görüntüleri görülmektedir. Bu şekillere göre yüzeyde oluşan çiziklerinden sürekli bir aşınma kaybının olduğu ve yüzeyden hızlı bir şekilde partiküllerin kalktığı [12, 26, 35] anlaşılmaktadır. Kaplamalı numunelerinden alınan optik görüntüler ise Şekil 10.37 - 10.48 arasında yer almaktadır.

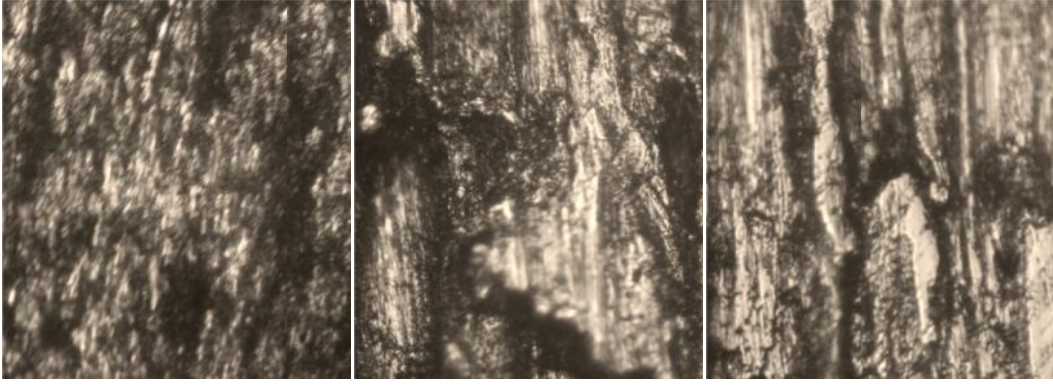


a) 75X

b) 150X

c) 300X

Şekil 10.34. AISI 1045 Numunesinin 2 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri

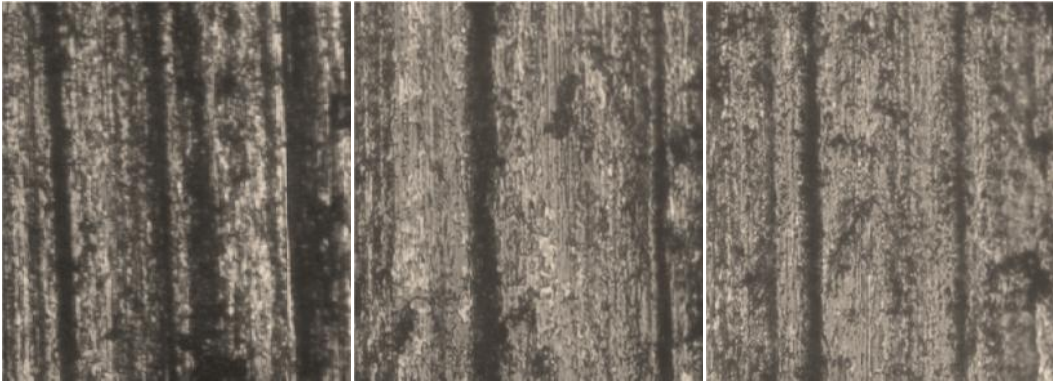


a) 75X

b) 150X

c) 300X

Şekil 10.35. AISI 1045 Numunesinin 4 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri

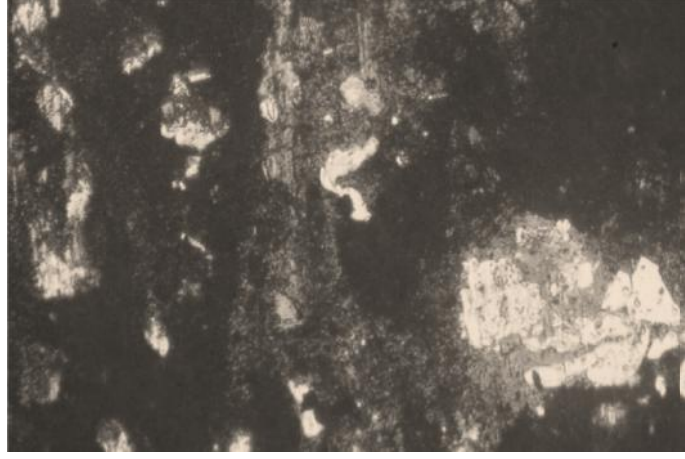


a) 75X

b) 150X

c) 300X

Şekil 10.36. AISI 1045 Numunesinin 6 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri



a) 75X

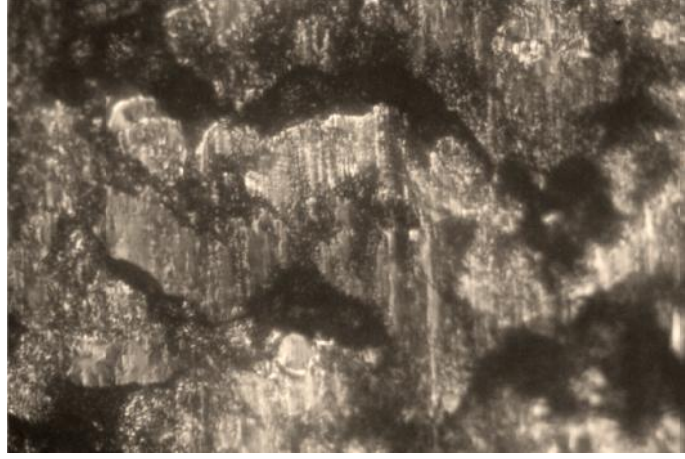


b) 150X

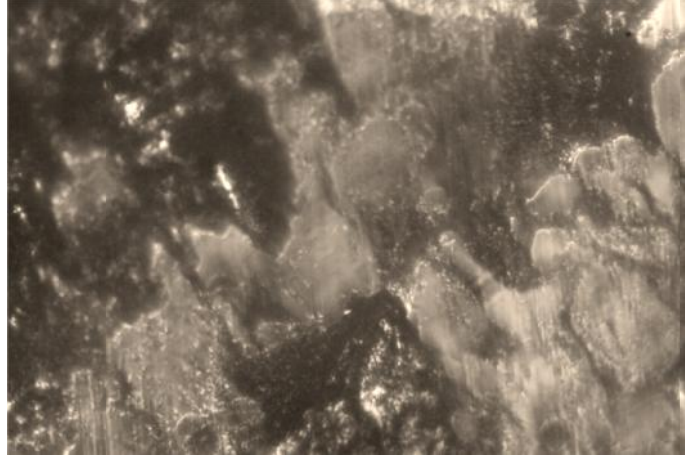


c) 300X

Şekil 10.37. Takviyesiz kaplama numunesinin 2 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri



a) 75X

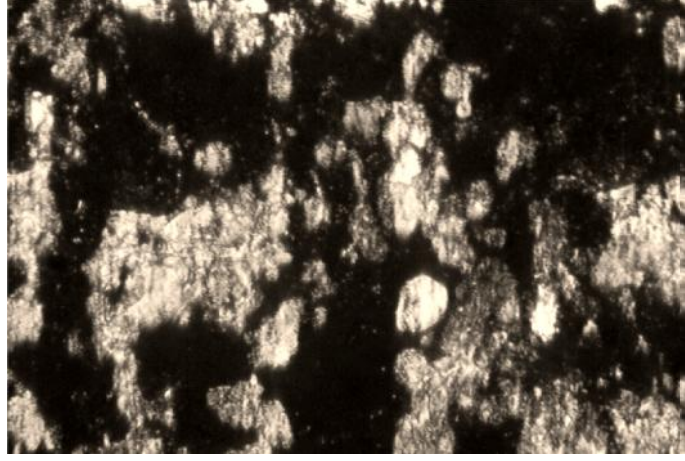


b) 150X



c) 300X

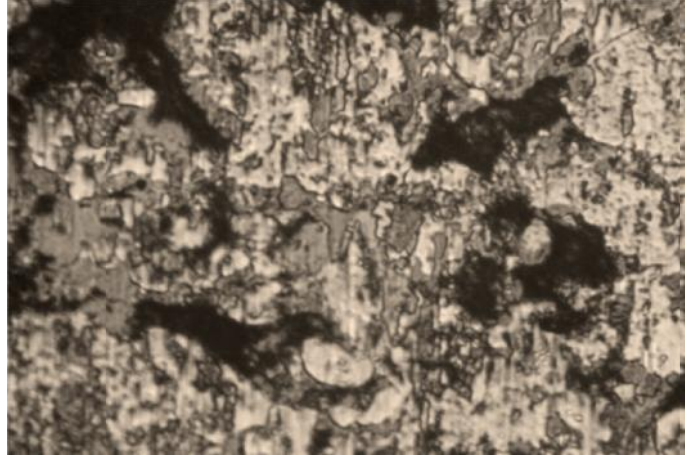
Şekil 10.38. Takviyesiz kaplama numunesinin 4 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri



a) 75X

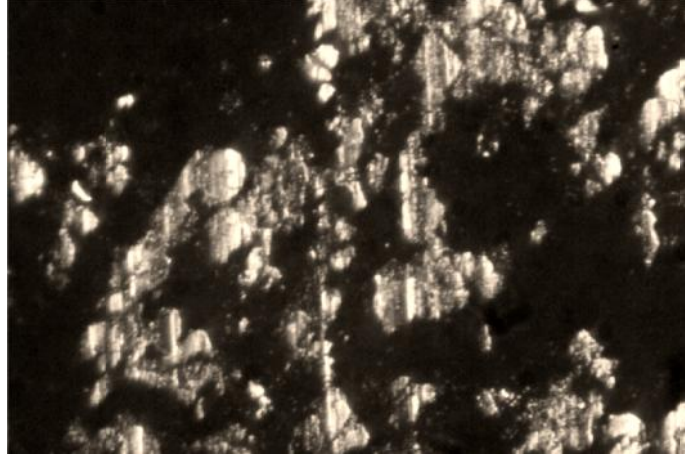


b) 150X

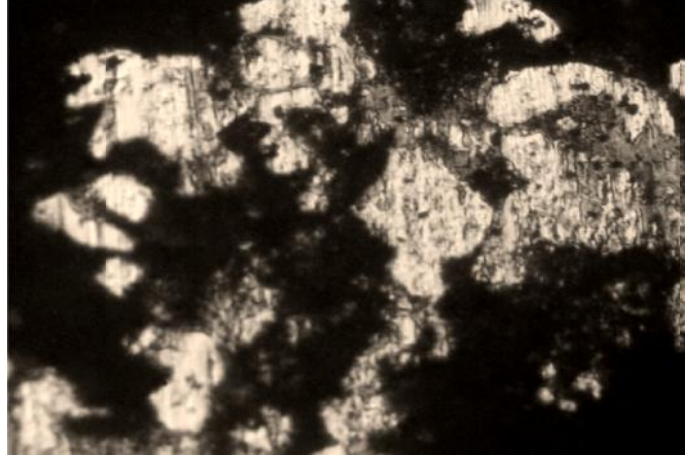


c) 300X

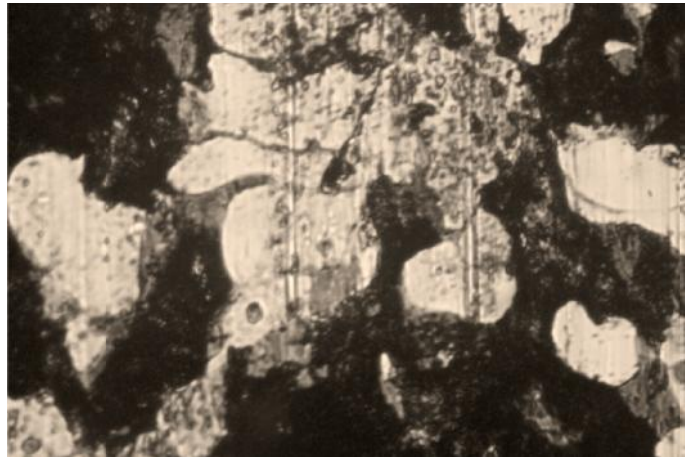
Şekil 10.39. Takviyesiz kaplama numunesinin 6 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri



a) 75X

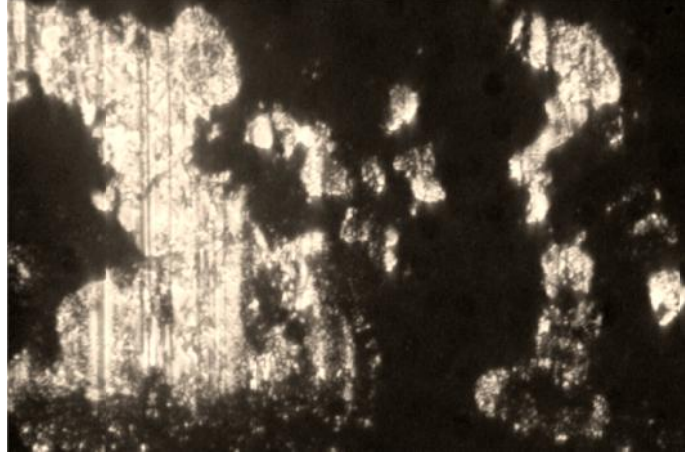


b) 150X



c) 300X

Şekil 10.40. %5 Takviyeli kaplama numunesinin 2 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri



a) 75X



b) 150X

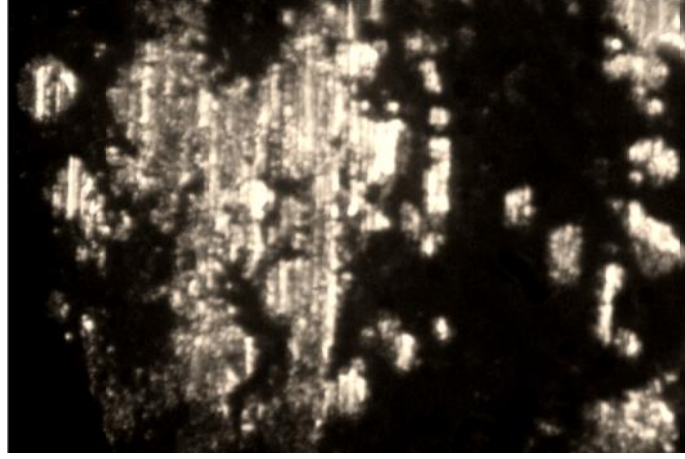


c) 300X

Şekil 10.41. %5 Takviyeli kaplama numunesinin 4 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri



a) 75X

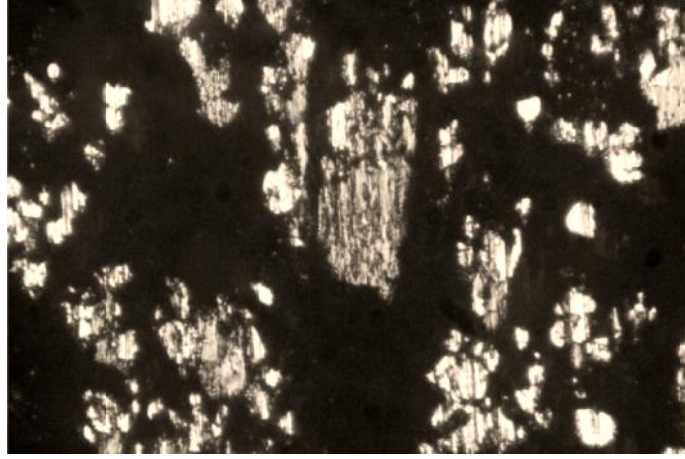


b) 150X

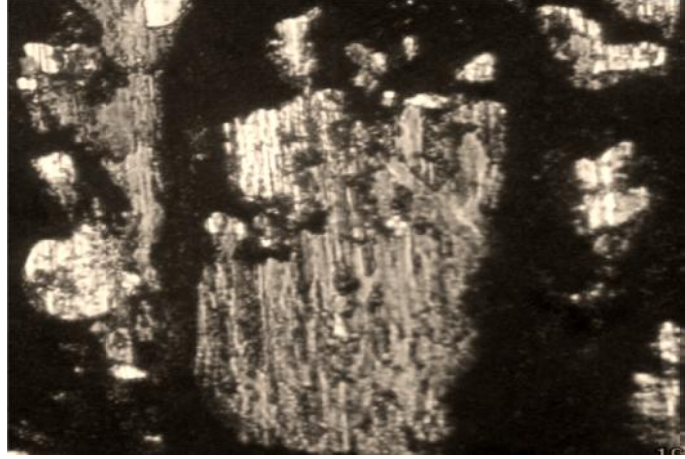


c) 300X

Şekil 10.42. %5 Takviyeli kaplama numunesinin 6 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri



a) 75X



b)150X

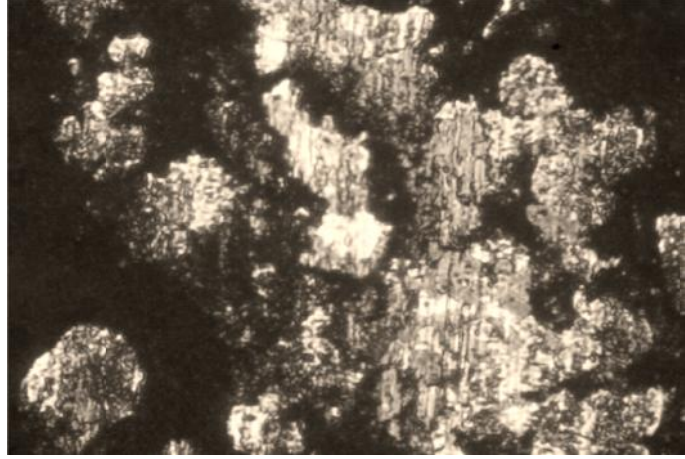


c)300X

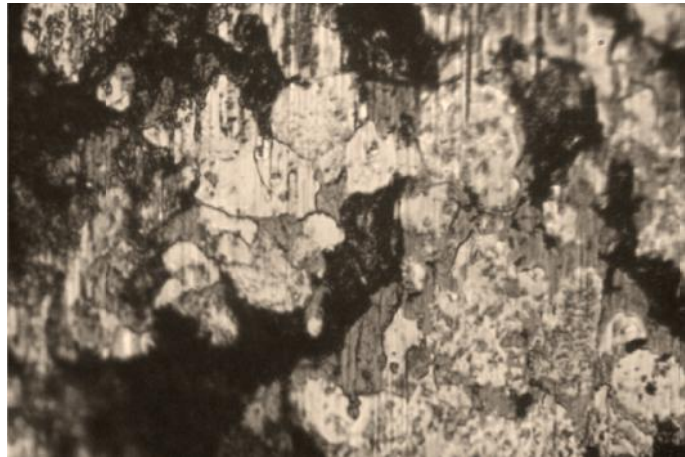
Şekil 10.43. %10 Takviyeli kaplama numunesinin 2 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri



a) 75X

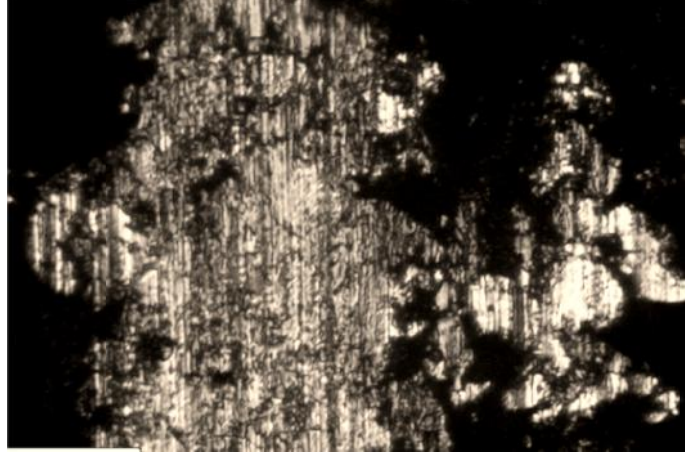


b) 150X

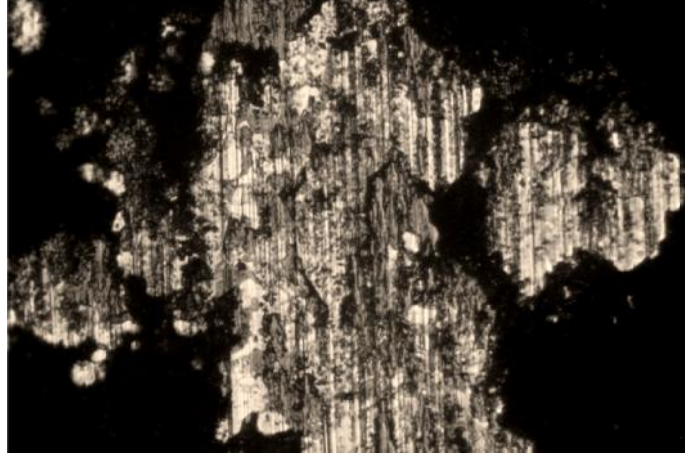


c) 300X

Şekil 10.44. %10 Takviyeli kaplama numunesinin 4 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri



a) 75X

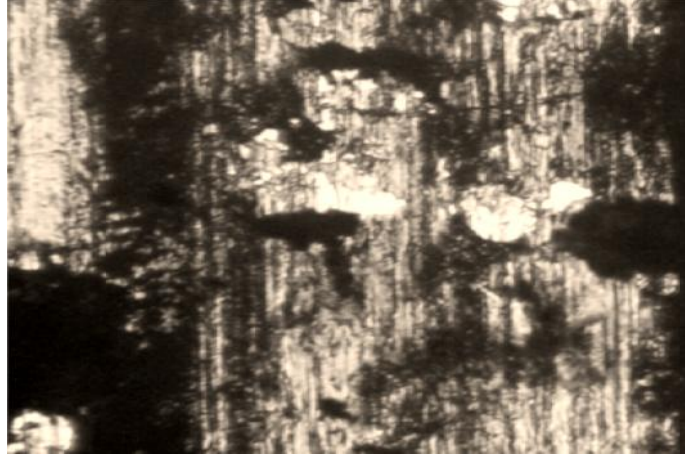


b) 150X



c) 300X

Şekil 10.45. %10 Takviyeli kaplama numunesinin 6 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri



a) 75X

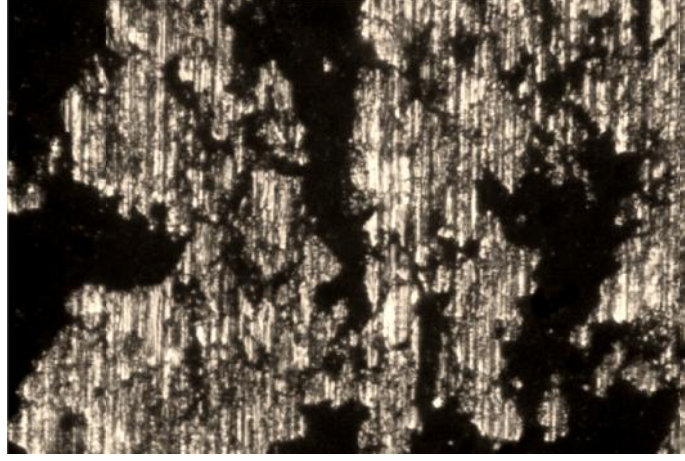


b) 150X

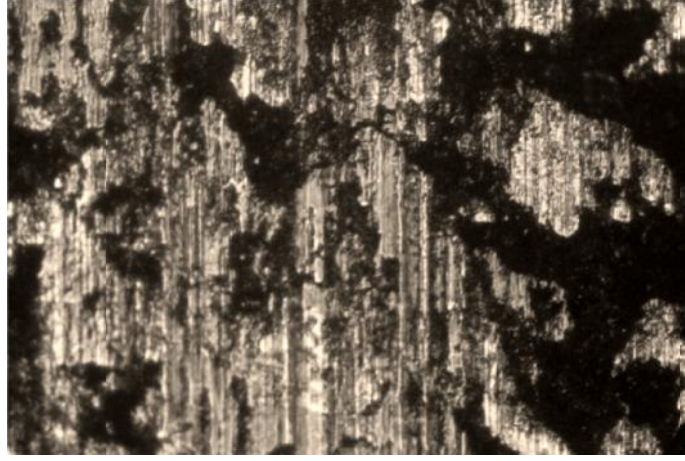


c) 300X

Şekil 10.46. %15 Takviyeli kaplama numunesinin 2 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri



a) 75X

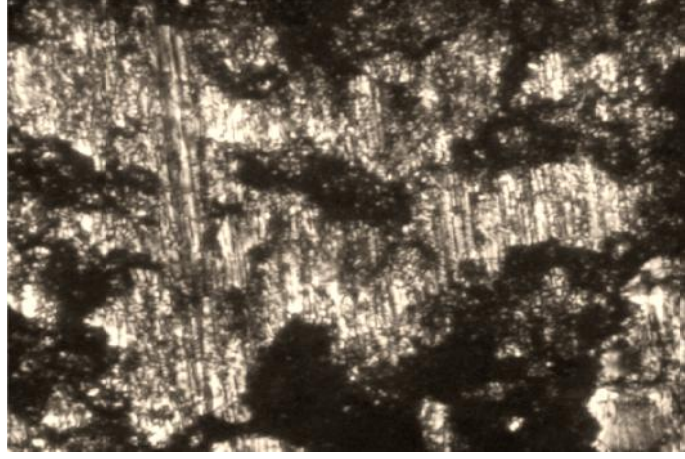


b) 150X

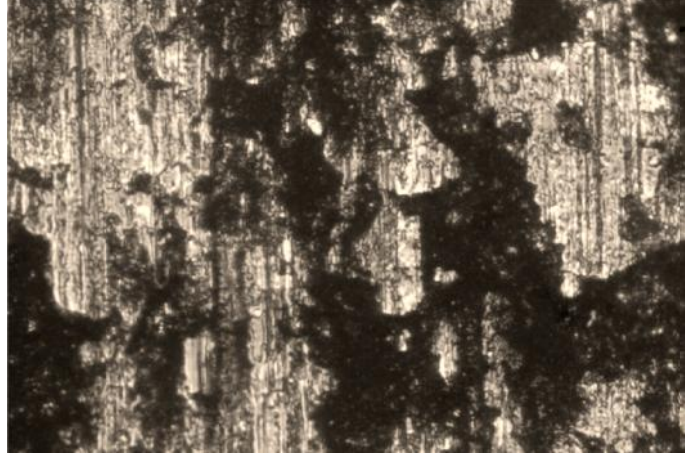


c) 300X

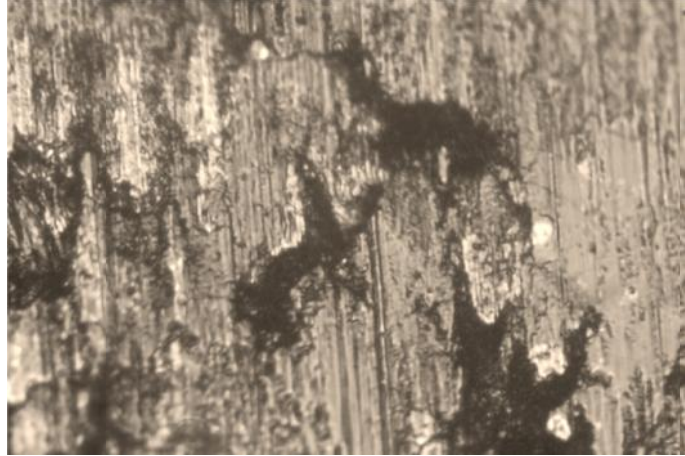
Şekil 10.47. %15 Takviyeli kaplama numunesinin 4 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri



a) 75X



b) 150X



c) 300X

Şekil 10.48. %15 Takviyeli kaplama numunesinin 6 kg yükte 3000 metre aşınmış yüzey görüntüleri

Aşınma deneyleri gerçekleştirilen kaplamalı deney numunelerinin yüzey morfolojileri incelendiğinde genel olarak 4 ve 6 kg yüklerde kazımalı bir aşınmanın olduğu görülmüştür. Hatta uygulanan yük arttıkça ortaya çıkan etkisinin de yükseldiği [18] görülmüştür. Öyle ki, bu durum yüzeyde oluşan sürtünme çiziklerinin yol açtığı aşınma yüzeylerinde oluşan izlerden de [12, 35, 26, 89] anlaşılmıştır (Şekil10.38-10.39, 10.41-10.42, 10.44-10.45, 10.47-10.48).

Kaplamalı numunelerin özellikle 150X ve 300X ölçeklerinde çekilen numunelerin optik görüntülerinde, aşınan malzeme yüzeyi üzerinde oluşan güçlü bir adhezyon ve kayma mesafesi şartlarına bağlı olarak kaplamaların aşınma yüzeylerinden kopan partiküllerden dolayı malzeme yüzeyinde çukurlar oluşturduğu [26, 35] görülmüştür (Şekil 10.37-10.48).

Yine seramik esaslı sert takviye partikülleri, aşındırıcının mikro-kesme hareketine karşı direnç gösterdiği gibi tane sınırlarını da güçlendirdiği [27, 90] düşünülmüştür. Genelde kaplamalı malzemelerde takviye oranının artmasıyla AISI 1045' e göre aşınmadaki toplam ağırlık kaybının azalma yönünde bir eğilime sahip olduğu görülmüştür.

Ayrıca aşınan yüzeylerde plastik deformasyonun da olabileceği düşünülmüştür. Bunun sebebi olarak ise, yüzeyde oluşan derin sürtünme izlerinden [90] de anlaşılmaktadır. Takviyeli kaplama numunelerinin aşınan yüzeylerinde ise plastik deformasyonun [24, 27, 35, 89, 90] azaldığı düşünülmektedir. Öyle ki, seramik takviyeli bu alaşımların kaplama yapısı içerisinde plastik akışı azaltılabileceği ve bu durumun seramik kaplamaların iyi aşınma göstermesindeki ana sebebi de ortaya koymaktadır.

11. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, alevle püskürtme tekniği kullanılarak AISI 1045 malzemesinin yüzeyine takviyeli (%5, %10, %15) ve takviyesiz olmak üzere genel olarak iki türde kaplanması sağlanılmıştır. Kaplamada kullanılan takviyesiz tozları yani ana tozu Metco 350 NS oluştururken, takviyeli tozları ise belirli oranlarda bir araya getirilen Metco 350 NS (%10) ile Metco 101 SF (%90) tozlarının mekanik alaşımlanması oluşturmuştur. Mekanik alaşımlama tekniği ile üretilen tozların SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız numunelerin ise mikro yapı, mikro sertlik ölçümleri alınmıştır. Ardından bu kaplamalı ve kaplamasız numuneler farklı yükler altında kuru sürtünme şartlarında adhesiv aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Daha sonra optik mikroskop yardımıyla aşınma numunelerinin yüzey görüntüleri alınmıştır. Yapılan bu çalışmadaki deneysel verilere göre şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- ❖ Yapılan mikro sertlik ölçümlerine göre, numunelerin dış yüzeyinden merkeze doğru 150 µm de alınan mikro sertlik değerlerinde en düşük kaplamasız AISI 1045 malzemesi (296 Hv) olurken, en yüksek mikro sertlik değerinin ise %15 takviyeli kaplama numunesinde (981.6 Hv) olduğu görülmüştür. Kaplamalı numuneler içerisinde geçiş bölgesindeki en yüksek mikro sertlik değeri de yine %15 takviyeli kaplamada (793.4 Hv) belirlenmiştir. Ayrıca yapılan takviye oranına göre de sertlik miktarı artış göstermiştir.
- ❖ Genel olarak yapılan kaplamalı numunelerde alev püskürtme prosesine özgü olarak poroziteli bir kaplama yapısına rastlanılmıştır.
- ❖ Yapılan aşınma deneylerinde üç farklı yükte de, aşınmaya en dayanıklı kaplama türü % 10 takviyeli TR-4 numunesinin olduğu saptanmıştır. Böylece bu takviye oranının aşınmada bir sınır takviyesi olduğu düşünülmüştür. Bu değer üzerine çıkıldığında aşınma oranındaki artışın sebebi, mekanik alaşımlama ile elde edilen matris ile takviye arasındaki bağın yetersiz olduğu kanaatine varılmıştır. Ayrıca mevcut grafikler dikkatli incelendiğinde bu numunelerin, kararlı sürtünme safhasına erken kayma mesafelerinde geçmesi

ve uzun süreli olarak ta takip ettirmesi diğer kaplamalı numunelere göre ağırlık kaybında daha düşük olmasına neden olmuştur.

- ❖ Genel olarak yapılan aşınma deneylerinde kaplamalı numunelerin altlık malzeme olan AISI 1045 e göre çok daha iyi aşınma direncine sahip olduğu anlaşılmıştır. Bunun sebebi ise yüzeye püskürtülen tozların altlık malzemeye göre sürtünme katsayısının yüksek bir direnç sağlamasından kaynaklı olduğu görülmüştür. Ayrıca aşınma deneylerinden alınan sürtünme katsayısı datalarına bakıldığında, %10 takviyeli numunenin sürtünme katsayısının diğer aşınma numunelerine göre yüksek olduğu görülmüştür.
- ❖ Aşınma deneyleri gerçekleştirilen kaplamalı deney numunelerinin yüzey morfolojileri incelendiğinde genel olarak takviyesiz tozların yer aldığı yüklerde gerçekleştirilen aşınma deneylerindeki numunelerin, aşınan yüzeylerinde diğer kaplamalı numunelere göre daha fazla sürtünme izlerine rastlandığı görülmüştür.
- ❖ Kaplama numunelerinin hepsinde görülen bir diğer husus ise aşınma yüzeylerinde geniş ölçekli çukurların yer almasıdır. Bu da, aşınma esnasında gerilmelerden kaynaklı, yüzeyden kopan partiküllerin neden olduğu kanısına varılmıştır.
- ❖ Takviyeli kaplama numunelerinin aşınma yüzeyleri incelendiğinde genel olarak hem takviyesiz hem kaplamasız numunelere göre yüzeyde çok daha az çiziklerin yer aldığı saptanmıştır. Bunun sebebi olarak ise mekanik alaşımlamış takviye tozlarından demir esaslı tozların, seramik toz ile aşınma yüzeyi arasında koruyucu bir kılıf oluşturduğu ve takviyeli tozların tane sınırını güçlendirdiği düşünülmüştür.

Bu çalışma konusu ile ilgili bundan sonraki çalışmalar için şu öneriler yapılabilir;

- ❖ Bu çalışmanın devamında takviye içindeki bağlayıcı toz oranındaki değişim gibi mekanik alaşımlama parametreleri (süre, bilye oranı, sıcaklık) çalışılabilir.
- ❖ Takviye malzemesinde yer alan alüminyum esaslı seramik toz yerine farklı seramik toz kullanılabilir.
- ❖ Yapılan kaplama türlerini altlık kaplama sayarak bu yüzeyin üzerine farklı bir kaplama da yapılabilir.
- ❖ Üretilen kaplama numuneleri için farklı hızlarda ve ortamlarda (sıvı, yağ) aşınma deneyleri gerçekleştirilebilir.
- ❖ Mevcut çalışmada farklı termal kaplama teknikleri kullanılabilir ve aşınma davranışlarına olan etkileri araştırılabilir.
- ❖ Mekanik alaşımlanmış takviye malzemesinin ana toz malzemesine katkı oranlarına yönelik optimizasyon çalışmaları yapılabilir.
- ❖ Kaplama kalınlığının çatlak oluşumu üzerine etkileri araştırılabilir.

12. KAYNAKLAR

- [1] **Schelleng, R. D., Donachie, S.J.**, 1983. Mechanical alloyed aluminum, *Metal Powder Report*, **38**, 357-359.
- [2] **Özel, S.**, 2009. Alüminyum Alaşımı ve Bronzu Yüzeyine Oksit ve Karbür Bileşiklerinin Plazma Sprey Yöntemiyle Kaplanması Araştırılması, *Doktora Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ
- [3] **Khoe, S., M., M.**, 1992. Ergimiş Boraks Banyosunda Çeliklere Vanadyum Karbür Kaplanması, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Man, H. C., Zhang, S., Cheng, F. T.**, 2007. Improving the wear resistance of robotic AA6061 by laser surface alloying with NiTi , *Materials Letters*, **61**, 4058-4061.
- [5] **Tekin, M.**, 2009. Alüminyum Titanyum Alaşımlarının Aşınma ve Korozyon Davranışına Yaşlandırma Isıl İşleminin Etkisinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [6] **Ceylan, İ.**, 2006. Toz Püskürtme Yöntemi ile Boru İç Yüzey Kaplamanın İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [7] **Sarı, N.Y., Tülbentçi, K.**, 1997. Modern Yüzey İşlemleri ile Aşınma Direncinin İyileştirilmesi, *7. Denizli Malzeme Sempozyumu, Bildiri Kitabı*, Denizli, 370-377.
- [8] **K. Kempton**, 1991. Where Thermal Spray Coatings Are Most Cost Effective, *Welding Journal*, 41-44.
- [9] **Voyer, J.**, 2010. Wear resistant Amorphous Iron Based Flame Sprayed Coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, **19**, 1013-1023.

- [10] **Kılınç, Y.**, 1999. Demir Bazlı Süper Alaşımların Mekanik Alaşımlama Metodu ile Üretilmesi ve Özelliklerinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [11] **Sarı, N.Y., Kaluç, E., Tülbençi, K.**, 1999. Alevle Isıl Püskürtme Uygulanarak Ç 1050 Çeliğinin Abrazif ve Eroziyon Aşınma Davranışının İyileştirilmesi, *Kaynak Teknolojisi 2. Ulusal Kongresi*, 177-185.
- [12] **Wang, Y., Jiang, S., Wang, M., Wang, S., Xiao, T.D., Strutt, P.R.**, 2000. Abrasive wear characteristics of plasma sprayed nanostructured alumina/titania coatings, *Wear*, **237**, 176-185.
- [13] **Eigen, N., Gartner, F., Klassen, T., Aust, E., Bormann, R., Kreye, H.**, 2005. Microstructures and properties of nanostructured thermal sprayed coatings using high-energy milled cermet powders, *Surface & Coatings Technology*, **195**, 344-357.
- [14] **Ji, G., Grosdidier, T., Liao, H.L., Morniroli, J.P., Coddet, C.**, 2005. Spray forming thick nanostructured and microstructured FeAl deposits, *Intermetallics*, **13**, 596-607.
- [15] **Cherigui, M., Fenineche, N.E., Coddet, C.**, 2005. Structural study of iron-based microstructured and nanostructured powders sprayed by HVOF thermal spraying, *Surface & Coating Technology*, **192**, 19-26.
- [16] **Sidhu, T.S., Prakash, S., Agrawal, R.D.**, 2006. Characterisations of HVOF sprayed NiCrBSi coatings on Ni and Fe based superalloys and evaluation of cyclic oxidation behaviour of some Ni-based superalloys in molten salt environment, *Thin Solid Films*, **515**, 95-105.
- [17] **Basak, A.K., Matteazzi, P., Vardavoulis, M., Celis, J.P.**, 2006. Corrosion–wear behaviour of thermal sprayed nanostructured FeCu / WC–Co coatings, *Wear*, **261**, 1042-1050.

- [18] Galvanetto, E., Borgioli, F., Bacci, T., Pradelli, G., 2006. Wear behaviour of iron boride coatings produced by VPS technique on carbon steels, *Wear*, **260**, 825-831.
- [19] Ulutan, M., 2007. AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması, *Doktora Tezi*, O.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [20] Çöğür, T., 2007. Toz Alev Spreyleme Yöntemi Kullanılarak Kaplanan Farklı Malzemelerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- [21] Mahesh, R.A., Jayaganthan, R., Prakash, S., 2008. Oxidation behavior of HVOF sprayed Ni- 5Al coatings deposited on Ni- and Fe- based superalloys under cyclic condition, *Materials Science and Engineering A*, **475**, 327-335.
- [22] Kamal, S., Jayaganthan, R., Prakash, S., Kumar, S., 2008. Hot corrosion behavior of detonation gun sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings on Ni and Fe-based superalloys in Na₂SO₄-60% V₂O₅ environment at 900°C, *Journal of Alloys and Compounds*, **463**, 358-372.
- [23] Bradai, M.A., Bounar, N., Benabbas, A., Ati, A., 2008. Study of microstructure, phases and microhardness of metallic coatings deposited by flame thermal spray, *Journal of Materials Processing Technology*, **200**, 410-415.
- [24] Eroğlu, A.S., 2008. Alüminyum Matrisli Seramik Partikül Takviyeli Kompozit Kaplamaların Plazma Püskürtme Tekniği ile Üretilmesi ve Aşınma Davranışının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [25] Minisker, M.A., 2009. Termal Sprey Yöntemiyle Oluşturulan Kaplamaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [26] Sharma, S.P., Dwivedi, D.K., Jain, P.K., 2009. Effect of La_2O_3 addition on the microstructure, hardness and abrasive wear behavior of flame sprayed Ni based coatings, *Wear*, **267**, 853-859.
- [27] Kai, T., Xiang-lin, Z., Hua, C., Ji-shan, Z., 2009. Oxidation and hot corrosion behaviors of HVOF-sprayed conventional and nanostructured NiCrC coatings, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **19**, 1151-1160.
- [28] Wu, Y., Lin, P., Wang, Z., Li, G., 2009. Microstructure and micro hardness characterization of a Fe-based coating deposited by high-velocity oxy-fuel thermal spraying, *Journal of Alloys and Compounds*, **481**, 719-724.
- [29] Rauch, J., Bolelli, G., Killinger, A., Gadow, R., Cannillo, V., Lusvarghi, L., 2009. Advances in High Velocity Suspension Flame Spraying (HVSFS), *Surface & Coatings Technology*, **203**, 2131-2138.
- [30] Bolelli, G., Bonferroni, B., Cannillo, V., Gadow, R., Killinger, A., Lusvarghi, L., Rauch, J., Stiegler, N., 2010. Wear behaviour of high velocity suspension flame sprayed (HVSFS) Al_2O_3 coatings produced using micron- and nano-sized powder suspensions, *Surface & Coatings Technology*, **204**, 2657-2668.
- [31] Hou, Q.Y., Wang, J.T., 2010. Influence of CeO_2 on the microstructure and wear resistance of iron-based alloy coating studied by Rietveld refinement method, *Surface & Coatings Technology*, **204**, 2677-2682.
- [32] Li, W., Li, C., 2010. Characterization of cold-sprayed nanostructured Fe-based alloy, *Applied Surface Science*, **256**, 2193-2198.
- [33] Senderowski, C., Bojar, Z., Wolczynski, W., Pawlowski, A., 2010. Microstructure characterization of D-gun sprayed Fe–Al intermetallic coatings, *Intermetallics*, **18**, 1405-1409.

- [34] Lampke, T., Wielage, B., Pohmurska, H., Rupprecht, C., Schuberth, S., Drehmann, R., Scherieber, F., 2011. Development of particle-reinforced nanostructured iron-based composite alloys for thermal spraying, *Surface & Coatings Technology*, **205**, 3671-3676.
- [35] Zhuang, M.A., Wei, W., Ji-feng, Z., Shi-zhi, D., Lian-yong, Z., Zhi-chao, L., 2011. Preparation and properties of flame-sprayed Mo-FeB-Fe cermet coatings, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **21**, 1314-1321.
- [36] Akın, C., 1998. Elektron Bombardıman ve TIG Kaynak Yöntemleri ile Fe-Ni Esaslı Hastelloy X Süper Alaşımına Varestreint Testinin Uygulanması, *Yüksek lisans tezi*, O.G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [37] Sims, T.C., Stoloff, S.N., Hagel, C. W., 1987. Superalloys II, John Wiley&Sons, New York.
- [38] Bartley, E., 1988. Super Alloys a Technical Guide.
- [39] White, C. H., 1986. Nickel Based Alloys, Wiggins Alloy.
- [40] Ezugwu, E. O., Bonney, J., Yamane, Y., 2003. An overview of the machinability of aeroengine alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, **134**, 233- 253.
- [41] Suryanarayana, C., Ivanov, E., Noufi, R., Contreras, M.A., Moore, J. J., 1999. Phase selection in a mechanically alloyed Cu-In-Ga-Se powder mixture, *J. Mater. Res.*, **14**, 377-383.
- [42] Altın, A., 2005. Nikel Esaslı Inconel 718 Süper Alaşımının İşlenebilirliğinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [43] Donachie, M.J., Donachie, S.J., 2002. Super Alloys a Technical Guide.

- [44] Ezugwu, E. O., 2005. Key improvements in the machining of difficult to cut aerospace superalloys, *International Journal of Machine Tools &Manufacture*, **45**, 1353-1367.
- [45] Suryanarayana, C., 2004. Mechanical Alloying and Milling, Marcel Dekker, New York.
- [46] Çelik, A., 2006. Nikel Esaslı Süper Alaşımların Talaşlı İşlenebilmesi için SiAlON Esaslı Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [47] Matthew, J.D.Jr, 1984. Superalloys, American Society for metals, USA.
- [48] Erdem, M., 2007. Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile Ni Esaslı bir Süper Alaşımın Üretilmesi ve Mikro Yapı, Mekanik ve Oksitlenme Özelliklerinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [49] Suryanarayana, C., 2001. Mechanical alloying and milling, *Progress in Materials Science*, **46**, 1-184.
- [50] Söyler, A.U., 2008. Mekanik Alaşımlama Yöntemleri ile Üretilmiş Al-Fe Tabanlı SiC ve Y₂O₃ Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [51] Li, Z. L., Williams, J. S., Calka, A., 1998. Temperatura effect of Si milling in NH₃, *Material Science Forum*, **269**, 271-276.
- [52] Bostan, B., 2003. Alüminyum - Karbon Tozlarından Mekanik Alaşımlama ve Sonrası İşlemlerle Al₄C₃ sentezlenmesi, *Doktora Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [53] Zhang, Y. F., LU, L., Yap, S. M., 1999. Prediction of the amount of PCA for mechanical alloying, *Journal of Materials. Proccessing Technology* **89**, 260-265.

- [54] **Yaz, M., Çelik, H.**, 2007. Cr-Ni'li Paslanmaz Çeliğin Co Esaslı Süper Alaşımlar İle Sert yüzey Kaplanabilirliğinin Araştırılması, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, **19**, 225-233.
- [55] **Bozkurt, T.**, 2006. TiN, TiAlN ve AlTiN Kaplamaların Aşınma Performanslarının İncelenmesi ve Farklı Altlık Malzemede TiN Kaplamanın Etkisinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Y.T.Enst. Müh. ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze-Kocaeli.
- [56] **Yaz, M.**, 2005. Düşük Karbonlu Yumuşak Çeliklerin Co Esaslı Süper Alaşım Elektrotları ile Kaplanabilirliğinin Araştırılması , *Doktora Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [57] **Çakan, A.**, 2006. AISI 1070 Çeliğinden Üretilen İşlemsiz, Yüzey İşlemli ve Sert Yüzey Kaplamalı Kesici Takımların Mekanik Özelliklerinin, Mikroyapı ve Kesme Performanslarının İncelenmesi, *Doktora tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [58] **Liu, D. M., Yang, Q., Troczynski, T.**, 2002. Sol-gel hydroxyapatite coatings on stainless steel substrates, *Biomaterials*, **23**, 691-698.
- [59] **Ezz, T., Crouse, P., Li, L., Liu, Z.**, 2006. Combined laser/sol-gel synthesis of Si/O/C coatings on mild steel, *Surface & Coatings Technology*, **200**, 6395-6399.
- [60] **Olding, T., Sayer, M. and Barrow, D.**, 2001. Ceramic sol-gel composite coatings for electrical insulation, *Thin Solid Films*, **398-399**, 581-586.
- [61] **Sarı, N.Y., Yılmaz, M.**, 2005. Ni-esaslı kaplamaların abrazif + erozif aşınma direncine ısıp püskürtme yönteminin ve WC ilavesinin etkisi, *Mühendis ve Makine*, **46**, 14-20.

- [62] **Güleç, A.**, 2006. Termal Püskürtme Tekniği ile Yüksek Performanslı Zn/Al (85/15) Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [63] **Leong, C.,S.**, 2000. Repair/Strengthening of Steel Angles Using Thermal Spray Metallizing, *Yüksek Lisans Tezi*, University of Manitoba, Canada.
- [64] <http://www.thermalspray.ws/spray%20and%20fuse.htm>, 29 Aralık 2010.
- [65] **Gonzalez, R., Cadenas, M., Fernandez, R., Cortizo, J.L. and Rodriguez, E.**, 2007. Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser, *Wear*, **262**, 301-307.
- [66] **Stokes, J.**, 2003. Production of coated and free-standing engineering componenets using the HVOF process, *Doktora Tezi*, Dublin City University, Ireland.
- [67] **Melkert S., Renner G.**, 1987. Wear and temperature charrac. of thermal sprayed yankee dryers, *1st National Thermal Spray Conf. Orlando Florida USA*, 227-232.
- [68] **Stokes, J.**, 2006. The theory and application of the HVOF thermal spray process, *Publisher Dublin University*, 204 p.
- [69] **Hazar, H.**, 2004. Bir Dizel Motoru Silindir Yüzeyinin Seramik Malzeme İle Kaplanarak Aşınma Davranışının Deneysel İncelenmesi, *Doktora Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [70] **Harvey, D.**, 1994. The ultimate coating-thermal spraying at Abington, *TWI Bulletin 2*, 28-30.
- [71] **Harvey, D.**, 1995. The tough truth-wear resistant coatings using HVOF, *TWI Bulletin 1*, 473(1).

- [72] **Bunshah, R.F.**, 2001. Handbook of hard coatings deposition technologies properties and applications, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, U.S.A. William Andrew Publishing, New York, U.S.A.
- [73] **Sert, H.**, 1990. Toz Püskürtme Sistemiyle Kaplanmış Metallerin Mekanik Deneyleri”, *Yüksek Lisans Tezi*, S.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [74] **Kahraman, N.**, 2000. Toz alev Spreyleme Yöntemi ile Kaplanan Numunelerde Kaplama Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [75] **Planche, M. P., Liao, H., Nordmand, B., Coddet, C.**, 2005. Relationships between NiCrBSi particle characteristics and corresponding coating properties using different thermal spraying processes, *Surface & Coating Technology*, **200**, 2465-2473.
- [76] **Kusoğlu, I. M., Çelik, E., Çetinel, H., Özdemir, I., Demirkurt, O., Onel, K.**, 2005. Wear behavior of flame-sprayed Al₂O₃-TiO₂ coatings on plain carbon steel substrates, *Surface & Coating Technology*, **200**, 1173-1177.
- [77] **Solmaz, M.Y.**, 2002. Ni₃Al+B Metaller Arası Bileşiğinin Değişken Sıcaklık Şartlarında Aşınma Davranışının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [78] **Kuzucu, V., Aksoy, M., Korkut, M.H. and Yildirim, M.M.**, 1997. The effect of niobium on the microstructure of ferritic stainless steel, *Materials Science and Engineering A*, **230**, 75-80.
- [79] **Korkut, M.H.**, 1997, Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapısı ve Asınması Üzerine Karbür Yapıcı Elementlerin Etkilerinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- [80] **Ay, M.**, 2003. Toz Metalürjisi Yöntemi ile Üretilen Fe-C-Mo-Cr₇C₃ Kompozitinin Abrasiv Aşınma Dayanımının Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [81] **Okay, F.**, 2006. PVD Yöntemi ile TiN Kaplı Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Adhesiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [82] **Çetin, M.**, 2005. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışlarının Geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [83] **Tekin, M.**, 2009. Alüminyum Titanyum Alaşımlarının Aşınma ve Korozyon Davranışlarına Yaşlandırma Isıl İşleminin Etkisinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [84] **Mutlu, H.**, 1996. Al-SiC Kompozitlerin Termomekaniksel İşlem Sonrası Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, D.E.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [85] Sulzer Metco, High Carbon Iron-Molybdenum Composite Powder, Material Product Data Sheet Technical Bulletin, Yayın No: DSMTS-0046.0, USA, 2010.
- [86] Sulzer Metco, Alumina 3% Titania Thermal Spray Powders, Material Product Data Sheet Technical Bulletin, Yayın No: DSMTS-0046.0, USA, 2010.
- [87] **Sundar, A.S.**, 2010, A Study On The Corrosion Behaviour Of Nanocrystalline Nickel In Aqueous Environments, *Yüksek Lisans Tezi*, *The University of Texas*, USA.
- [88] **Cullity, B.D.**, 1974, Elements of X-Ray Diffraction Reading, MA: Addison-Wesley, 411-412, USA.

- [89] **Aktaş, H.**, 2007. Alüminyum Matrisli Al_2O_3 Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşımlama Tekniği İle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [90] **Altuner, S.**, 2011. Y_2O_3 Kaplanmış Al_2O_3 Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Aşınma Davranışlarının Karakterizasyonu, *Doktora Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

1987 tarihinde Şanlıurfa merkezde doğdu. İlköğretimini Uzun Mehmet İlköğretim Okulu'nda tamamladı. Atakent Lisesi'nde ortaöğretimini tamamladıktan sonra 2005 yılında üniversite sınavı ile Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne yerleşti. 2009 yılında makine mühendisi unvanı ile mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği İmalat ve Konstrüksiyon Bölümünde yüksek lisans eğitime başladı. Yüksek lisans eğitime devam ederken Iğdır Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği İmalat ve Konstrüksiyon Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atandı.