

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**45Mn5 ISLAH ÇELİĞİNİN İSİL İŞLEM VE ERGİTME YÖNTEMLERİ
İLE YÜZEY MODİFİKASYONU İŞLEMLERİ SONRASI MEKANİKSEL
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Serkan ISLAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI

ELAZIĞ, 2005

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**45Mn5 ISLAH ÇELİĞİNİN ISIL İŞLEM VE ERGİTME YÖNTEMLERİ
İLE YÜZEY MODİFİKASYONU İŞLEMLERİ SONRASI MEKANİKSEL
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Serkan ISLAK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI**

Bu tez 2.../...9./ 2005 Tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile Başarılı / Başarısız Olarak Değerlendirilmiştir.

Üye: (Danışman): Prof. Dr. M.Mustafa YILDIRIM.

Üye: Yrd. Doç. Dr. Mustafa TAŞKIN.

Üye: Yrd. Doç. Dr. Cebeli ÖZEK.

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 07/09/2005 tarih ve 2005-...29/3.. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŐEKKÖR

Bu tez çalışmasının hazırlanması esnasında, bana her türlü yardım ve desteklerini esirgemeyen; başta danışman hocam Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakóltesi, Metal Eğitimi Bölümü ve Metalurji Eğitimi Ana Bilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. M. Mustafa YILDIRIM'a ve deneysel çalışmalarımda bana yardımlarını esirgemeyen Arř. Gör. Sayın Dr. Soner BUYTOZ'a teőekkürlerimi arz etmeyi bir borç bilirim.

Tezime maddi yönden katkıda bulunan ve destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) Birimi'ne teşekkür ederim ve saygılarımı sunarım.



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR

İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	IV
TABLolar LİSTESİ.....	VII
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ.....	1
2. YÜZEY MODİFİKASYONU.....	3
3. YÜZEY DEĞİŞİMİ.....	4
3.1. Kimyasal Bileşimi Değiştirmeksizin Yapılan Yüzey Sertleştirme İşlemleri.....	4
3.1.1. Alevle Yüzey Sertleştirme.....	4
3.1.2. Endüksiyonla Yüzey Sertleştirme.....	6
3.1.3. Lazer Işını ile Yüzey Sertleştirme.....	7
3.1.4. Fırında Sertleştirme.....	8
3.2. Yüzeyin Kimyasal Bileşimini Değiştirerek Yapılan Yüzey Sertleştirme Yöntemleri.....	8
3.2.1. Karbürleme.....	8
3.2.2. Nitrürleme.....	11
3.2.3. Karbonitrürleme.....	16
3.2.4. Borlama.....	16
3.2.5. İyon İmplantasyonu.....	21
4. YÜZEY KAPLAMA.....	23
4.1. Buhar Fazı Yöntemleri.....	23
4.1.1. PVD Yöntemleri.....	24
4.1.2. CVD Yöntemleri.....	27
4.2. Sol-Jel Yöntemi.....	28
4.2.1. Dip Kaplama Yöntemi.....	29
4.3. Kaplama Ve Anotlama Yöntemleri (Elektrolitik Kaplama).....	30
4.4. Ergitme Yöntemleri.....	32
4.4.1. Isıl Püskürtme (Thermal Spray).....	32
4.4.1.1. Alevle Püskürtme Yöntemi.....	33
4.4.1.2. Plazma Jeti İle Püskürtme	35
4.4.1.3. Patlamalı Püskürtme (D-Gun) Yöntemi.....	37
4.4.1.4. Elektrik Arkı İle Püskürtme Yöntemi.....	37
4.4.1.5. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Püskürtme Yöntemi.....	38

4.4.2. Kaynak.....	42
4.4.2.1. Lazer Işın Kaynağı (LBW).....	42
4.4.2.2. Elektron Işın Kaynağı (EBW).....	44
4.4.2.3. Tozaltı Kaynağı (SAW).....	45
4.4.2.4. Gaz Tungsten Ark (GTA) Kaynağı.....	46
4.4.2.5. Plazma Ark Kaynağı (PAW).....	53
4.4.2.6. Sürtünme Kaynaklı Kaplama.....	55
5. AŞINMA.....	57
5.1. Aşınma Sisteminde Temel Unsurlar.....	57
5.2. Aşınmayı Etkileyen Faktörler.....	58
5.3. Aşınma Direncine Karbürün Etkisi.....	59
5.4. Aşınma Direncine Matrisin Etkisi.....	59
5.5. Aşınma Mekanizmaları.....	60
5.5.1. Adhezif Aşınma.....	60
5.5.2. Abrasiv Aşınma.....	61
5.5.3. Yorulma Aşınması.....	63
5.5.4. Eroziv Aşınma.....	63
5.5.5. Öğütmeli Aşınma.....	64
5.5.6. Oymalı Aşınma.....	64
5.5.7. Kazımalı Aşınma.....	64
5.5.8. Koroziv Aşınma.....	64
5.6. Aşınma Deneyleri Ve Ölçüm Yöntemleri.....	64
5.6.1. Aşınma Deneyleri.....	64
5.6.1.1. Ağırlık Farkı Yöntemi.....	66
5.6.1.2. Kalınlık Farkı Yöntemi.....	67
5.6.1.3. İz Değişimi Yöntemi.....	67
5.6.1.4. Radyo İzotop Yntemi.....	67
5.6.1.5. Akustik Emisyon Yöntemi.....	67
5.6.2. Abrasiv Aşınma İçin Deney Yöntemleri.....	68
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	69
6.1. Deneysel Yöntem.....	69
6.2. GTA İle Yüzey Alaşımlama.....	69
6.3. Mikroyapı İncelemeleri Ve Sertlik Ölçümleri.....	73
6.4. Abrasiv Aşınma Testi.....	74
7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	75
7.1. Mikroyapı İnceleme Sonuçları.....	75
7.2. Abrasiv Aşınma Test Sonuçları.....	90

7.3. Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	96
8. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER.....	98
9. KAYNAKLAR.....	100



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: Alevle yüzey sertleştirme (kademeli spin) işleminin prensip şeması.....	5
Şekil 3.2: Endüksiyonla Yüzey Sertleştirmenin Şematığı.....	6
Şekil 3.3: Lazer ışını ile yüzey sertleştirme işlemi.....	7
Şekil 3.4: Katı ortamda borlamanın prensibi.....	18
Şekil 3.5: Akışkan Yataklı Borlamanın Şematığı.....	20
Şekil 4.1: Püskürtme mekanizmasının şematik diyagramı.....	25
Şekil 4.2: Plazma Kaynaklı PVD Kaplama İşlemi.....	26
Şekil 4.3: Sol-Jel İle Dip Kaplama.....	30
Şekil 4.4: Isıl püskürtme tabakası oluşumu.....	33
Şekil 4.5: Tel ile alev püskürtme.....	34
Şekil 4.6: Plazma Jeti İle Püskürtme.....	35
Şekil 4.7: Plazma Püskürtme Yönteminin İşlem Değişkenleri.....	36
Şekil 4.8: JetKote HVOF Tabancası.....	39
Şekil 4.9: Elmas kaplamaların çöktürülmesinde kullanılan bir ısı DC plazma jeti.....	41
Şekil 4.10: Lazer Işın Kaynağı ile Yüzey Alaşımlama.....	44
Şekil 4.11: Elektron ışın kaynağının şematığı.....	45
Şekil 4.12: Tozaltı kaynağında mümkün olabilecek tel düzenlemeleri.....	46
Şekil 4.13: Dört elektrotlu merkezden metal toz ilaveli tozaltı kaynak sistemi.....	46
Şekil 4.14: Gaz tungsten ark kaynak yönteminin prensibi.....	47
Şekil 4.15: Sıcak tel beslemeli GTA sistemi.....	53
Şekil 4.16: PAW ile Yüzey Alaşımlama.....	54
Şekil 4.17: Sürtünme Kaynaklı Kaplama.....	56
Şekil 5.1: Bir Tribolojik Sistemin Şematik Gösterimi.....	58
Şekil 5.2: İzafi aşınma direnci ile esas malzeme ile abrasivin sertliği arasındaki oran arasındaki ilişki.....	60
Şekil 5.3: Abrasiv aşınma mekanizmaları: a) mikrokese, b) kırılma, c) yorulma, d) tane sökülmesi.....	61
Şekil 5.4: Abrasiv aşınmanın modelleri: a) İki cisimli model, b) Üç cisimli model.....	62
Şekil 5.5: Yorulma Aşınması.....	63
Şekil 5.6: Erozyon Aşınması.....	63
Şekil 5.7: Aşınma Türlerinin Şematik Resimleri.....	65
Şekil 6.1: Alt malzeme/kaplama tozu çiftinin kaplama öncesi tasarımı.....	69
Şekil 6.2: GTA kaynak yöntemi ile yüzey alaşımlama işleminin şematik resmi.....	70

Şekil 6.3: (a) SiC tozunun morfolojisi, (b) SiC tanesi üzerinden alınan EDS analiz sonucu.....	71
Şekil 6.4: SiC kaplama tozunun XRD analiz sonucu.....	72
Şekil 6.5: GTA yöntemiyle yüzey alaşımlama yapılan 45Mn5 çeliğinin farklı üretim hızlarındaki üst yüzey görünüşleri.....	72
Şekil 6.6: Abrasiv Aşınma Testi Aparatı.....	74
Şekil 7.1: GTA yöntemiyle üretilen 3 nolu numunenin SEM görünümü (X250).....	76
Şekil 7.2: GTA ile Modifiye Edilmiş 3 Nolu Numunenin Üst Tabaka, Arayüzey ve Alt Tabakanın SEM Fotoğrafı.....	76
Şekil 7.3: 3 nolu numunenin matris bölgesinden (a bölgesi) alınan EDS sonucu.....	77
Şekil 7.4: 3 nolu numunenin dendrit bölgesinden (b bölgesi) alınan EDS sonucu.....	77
Şekil 7.5: 3 nolu numunenin XRD analiz sonucu.....	78
Şekil 7.6: 3 nolu numune için dendritlerin yönlerinin ve boyutunun değişimi (a) arayüzey bölgesi, (b) kaplamanın merkez bölgesi, (c) kaplamanın üst bölgesi.....	79
Şekil 7.7: 4 nolu numunenin mikroyapı fotoğrafları (a) alt malzeme, arayüzey ve kaplama bölgesi (X100), (b) arayüzey bölgesi (X250), (c) kaplama bölgesi (X250).....	80
Şekil 7.8: 4 Nolu Numunede “A” Noktasının EDS Analiz Sonucu.....	81
Şekil 7.9: 5 nolu numunenin SEM fotoğrafı (X100).....	81
Şekil 7.10: 5 nolu numunenin (a) arayüzey ve (b) kaplama bölgesi SEM fotoğrafları (X250).....	82
Şekil 7.11: 5 nolu numunede a, b, c bölgeleri.....	83
Şekil 7.12: 5 nolu numune için “a” noktasının EDS analiz sonucu.....	83
Şekil 7.13: 5 nolu numune için “b” bölgesinin EDS analiz sonucu.....	84
Şekil 7.14: 5 nolu numune için “c” bölgesinin EDS analiz sonucu.....	84
Şekil 7.15: 9 nolu numunenin (a) genel görünüm, (b) kaplama bölgesi SEM fotoğrafı (X100).....	85
Şekil 7.16: 9 nolu numune için genel EDS analiz sonucu.....	86
Şekil 7.17: 9 nolu numunenin XRD analizi.....	86
Şekil 7.18: 11 nolu numunenin genel SEM fotoğrafı (X100).....	87
Şekil 7.19: 11 nolu numune için “a” bölgesinin EDS analiz sonucu.....	87
Şekil 7.20: 11 nolu numune için “b” bölgesinin EDS analiz sonucu.....	88
Şekil 7.21: 18 nolu numunenin SEM fotoğrafı (X100).....	88
Şekil 7.22: 18 nolu numune için “a” bölgesinin EDS analiz sonucu.....	89
Şekil 7.23: 18 nolu numune için “b” bölgesinin EDS analiz sonucu.....	89
Şekil 7.24: Enerji girdisi ve toz ilevesinin arayüzey tabaka kalınlığına etkisi.....	90

Şekil 7.25: SiC ile yüzeyi modifiye edilmiş numunelerin 20 N yüke göre aşınma mesafesine bağlı kütle kaybı değişim grafiği.....	91
Şekil 7.26: SiC ile yüzeyi modifiye edilmiş numunelerin 30 N yüke göre aşınma mesafesine bağlı kütle kaybı değişim grafiği.....	91
Şekil 7.27: SiC ile kaplanan numunelerin uygulanan yüke göre toplam kütle kaybı değişimi.....	92
Şekil 7.28: Kütle kaybının enerji girdisi, ilave toz miktarı ve üretim hızına bağlı ilişkisi.....	92
Şekil 7.29: SiC ile kaplanan numunelerin (a) 20 N yüke göre, (b) 30 N yüke göre aşınma mesafesine bağlı aşınma oranı değişimi.....	93
Şekil 7.30 : 0 nolu numunenin (orjinal numune) 20 N yük altında aşınma yüzeyinden alınan SEM fotoğrafı.....	94
Şekil 7.31 : 8 nolu numunenin 20 N yük altında aşınma yüzeyinden alınan SEM fotoğrafı.....	94
Şekil 7.32: 10 nolu numunenin 20 N yük altında aşınma yüzeyinden alınan SEM fotoğrafı.....	95
Şekil 7.33: 12 nolu numunenin 20 N yük altında aşınma yüzeyinden alınan SEM fotoğrafı.....	95
Şekil 7.34: 16 nolu numunenin 20 N yük altında aşınma yüzeyinden alınan SEM fotoğrafı.....	96
Şekil 7.35: SiC ile yüzeyi modifiye edilen numunelerin (a) yüzeyden alt tabakaya doğru sertlik değişim grafiği, (b) Kaplamanın üst kısmından alt malzemeye doğru değişim bölgeleri.....	97
Şekil 7.36: SiC ile kaplanan numunelerin kaplama yüzeyinin mesafeye bağlı makrosertlik değişim grafiği.....	97

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1: HVOF Yönteminin Uygulandığı Çeşitli Endüstri Kolları ve Uygulamaları.....	38
Tablo 4.2: Tungsten elektrod çeşitleri ve özellikleri.....	49
Tablo 6.1: Yüzey Alaşımlama İçin Kullanılan Alt Malzemenin (45Mn5 Çeliği) ve Kaplama Tozunun (SiC) Kimyasal Bileşimi.....	69
Tablo 6.2: Yüzey alaşımlama(modifikasyonu) için üretim parametreleri.....	70
Tablo 6.3: Üretim parametrelerinin sertliğe ve ıslatılabilirliğe etkisi.....	73
Tablo 7.1: SiC Tozuyla Yüzey Modifikasyonu Yapılan Numunelerin Yüzeylerinden Alınan Spektrel Analiz Sonuçları.....	75
Tablo 7.2: 3 Nolu Numunede Elde Edilen Fazların Kristal Yapıları.....	79

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

45Mn5 ISLAH ÇELİĞİNİN ISIL İŞLEM VE ERGİTME YÖNTEMLERİ İLE YÜZEY MODİFİKASYONU İŞLEMLERİ SONRASI MEKANİKSEL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Serkan ISLAK

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı
2005, Sayfa: 105

Bu çalışmada, 45Mn5 ıslah çeliğine GTA yöntemi ile silisyum karbür (SiC) tozu kullanarak yüzey alaşımlama işlemi uygulanmıştır. Numune kalınlığı sabit tutulup tozun farklı miktarları (gram) kullanılmış olup, bunun yanında enerji girdisi, kaplama hızı ve kaplama akımı gibi işlem parametreleri değişken tutulup; bunların mikroyapısal değişmelere, mikrosertliğe, makrosertliğe ve abrasiv aşınma direncine karşı etkileri araştırılmıştır.

Kaplamanın mikroyapısı, optik mikroskop (OM), taramalı electron mikroskobu (SEM), enerji dağılım spectrum (EDS), X-ışını difraksiyonu (XRD) ve spectral analizler ile tespit edilmiştir. Modifiye tabakalarının sertlikleri mikrosertlik ölçme cihazı ile abrasiv aşınma özellikleri ise pin-on-disk test yöntemi ile belirlenmiştir. Aşınma testleri sonrası numunelerin kütle kayıpları tespit edilerek aşınma oranları elde edilmiştir.

Alt malzeme olarak 45Mn5 çeliği kullanılmış olup, SiC tozu 0.5, 1, 1.5, 2 ve 2.5 gr. miktarlarında kullanılmıştır. Bu miktar değişiminin kaplamanın özelliklerine etkisi incelenmiştir. SiC yüzey modifikasyonlu numunelerde, ötektik altı ve ötektik üstü mikroyapılar elde edilmiştir. Katılaşmanın hızlı olmasından dolayı dendritik yapı meydana gelmiştir. Dendritlerin boyutları, soğuma hızının yüksek olmasından dolayı, alaşımlanmış bölgenin üst kısmına doğru küçülmekte ve doğrultuları çeşitlenmektedir. Ayrıca farklı biçim ve konsantrasyona sahip Fe_7C_3 , Fe_2C , $FeSi_2$ ve

$\text{Fe}_{0.4}\text{Mn}_{3.6}\text{C}$ karbür ve kompleks fazlarını içeren mikroyapılar meydana gelmiştir. Bu yapıların oluşumu kaplama hızı, enerji girdisi ve toz miktarına göre değişmektedir.

Mikroyapıdaki FeSi_2 ve sert karbür (Fe_7C_3 , Fe_2C) fazlarının varlığından dolayı, kaplama yüzeyinin makrosertliği önemli ölçüde artmıştır. Ölçülen sertlik değerleri 510-1250 HV_3 'dir. Mikrosertlik ölçümlerinde ise; yüzeyden alt malzemeye doğru bir hat boyunca azalma olmuştur. Bu da kaplama hızı, soğuma hızı ve katılma olayı ile meydana gelen faz dönüşümü ile açıklanabilir.

Aşınma oranları, abrasiv aşınma deneyi sonucunda elde edilen kütle kayıpları ölçülerek elde edilmiştir. SiC ile yapılan yüzey alaşımlama işleminde en yüksek kütle kaybının, kaplama hızının yüksek, enerji girdisinin düşük ve toz ilavesinin az olduğu şartlarda olduğu tespit edilmiştir. Minimum kütle kaybı ise düşük kaplama hızı, yüksek enerji girdisi ve yüksek toz miktarında tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: GTA yöntemi, yüzey alaşımlama, ısı girdisi, abrasiv aşınma, silisyum karbür (SiC).

ABSTRACT
Masters Thesis

**THE INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF 45Mn5 STEEL AFTER
SURFACE MODIFICATION PROCESSES**

Serkan ISLAK

Firat University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Metallurgy Education
2005, Page: 105

In this study, on the surface of a 45Mn5 steel a silicon carbide (SiC) powder layer was coated with use of GTA method. As first the specimen thickness was fixed and subsequently the different powder quantities (in gram) were used. Besides, process parameters such as heat input, coating speed and welding current were varied and the effect of these parameters on microstructural changing, microhardness, macrohardness and abrasive wear resistance of modified materials were investigated.

The microstructure of the coating layer was characterized by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), energy dispersive spectrometer (EDS) and spectral analysis. While the hardness of the modified layer was measured by microhardness tester, abrasive wear properties were evaluated under pin-on-disc abrasive wear test conditions. After wear tests, wear rates were calculated via the mass losses of the specimens which were measured.

While the 45Mn5 steel was used as the substrate material, coating powder (SiC) was alloyed at 0.5, 1, 1.5, 2 and 2.5 gr. quantities on to surface of these steel. Effect on the properties of the coating materials amount of SiC was investigated experimentally. The hypoeutectic and hypereutectic microstructures were observed in coated specimens. Because of rapid solidification, dendritic phases were formed. Because of high cooling rate, dendrites become finer from interface zone to top of coating and their directions were getting differently. Besides, microstructures containing Fe_7C_3 , Fe_2C , FeSi_2 and $\text{Fe}_{0.4}\text{Mn}_{3.6}\text{C}$ carbide and intermetallic complex phases having different shape and

composition were formed. The forms of these phases were depended on the coating speed, the energy input and the powder quantity.

Coating surface macrohardness importantly increased because hard phases such as FeSi_2 and carbides (Fe_7C_3 , Fe_2C) exist in microstructure. The hardnesses values measured between 510-1250 HV_3 . As the microhardness measurements, the hardness decreased along a line from coating toward to substrate material. This can be explained with phase transformations which the coating speed, the cooling rate and solidification conditions occurred.

Wear rates were calculated using mass losses obtained in the result of the abrasive wear test. In surface alloying process used SiC as coating powder, the maximum mass loss was found by high coating speed, low energy input and low powder quantity conditions. The minimum mass loss also was found by low coating speed, high energy input and high powder quantity conditions.

Key words: GTA process, surface alloying, heat input, abrasive wear, silicon carbid (SiC)



1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelere paralel olarak malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek ve yeni mühendislik özellikleri kazandırmak amacıyla yüzey mühendisliğine olan ilgi daha da artmaktadır. Çünkü malzemelerde meydana gelen aşınma, erozyon, korozyon ve sürtünme gibi istenmeyen etkileri önlemek amacıyla yüzey modifikasyonu işlemlerine gerek duyulur. Oluşturulan yüzey katları, yüzeyin mekanik özelliklerini geliştirerek onların kullanılacakları ortama karşı daha dayanıklı olmasını sağlar. Yüzey işlemleri uygulandıkları metalin sadece mekanik özelliklerini geliştirmek için değil, aynı zamanda onlara estetik güzellik kazandırmak amacıyla da yapılmaktadır. Malzeme yüzeyinin mekanik özelliklerini geliştirmenin en basit ve ekonomik yolu, ısıtılmalardan yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirmeksizin yapılan yüzey sertleştirme işlemleridir. Bu yolla; metal yüzeyinin sert ve aşınmaya dayanıklı, iç kısmının ise yeterli dayanımda ve enerji absorbe edecek şekilde tok olarak kalması sağlanır. Ayrıca difüzyon esaslı yöntemlerle de yüzey başkalaşımı sağlamak mümkündür. Burada C, N ve B gibi küçük atom çaplı elementler yüzeye yayılım yolu ile geçirilir (Yıldırım ve diğ., 2001).

1970'li yıllarda malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla iyon implantasyonu üzerinde çalışmalar yapılmış, önemli ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Çalışmalar, özellikle çeliklerin sertlik ve aşınma dayanımı (tribolojik performans) gibi yüzey özelliklerinin iyon implantasyonu yoluyla geliştirilebilirliği üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Son 20 yıllık süreçte iyon – çelik kombinasyonu ile ilgili bir çok araştırma yapılmıştır. Bu alanda en göze çarpan işlemler; azot elementiyile, krom veya titanyum gibi metallerin implantasyonudur.

Son yıllarda buhar fazından çöktürme yoluyla kaplama tekniklerinin geliştirilmesiyle, kaplamada kullanılan malzeme çeşitliliği artmış ve her tür malzemenin kaplama malzemesi olarak kullanılması sağlanmıştır. Buhar fazı ile kaplama yöntemlerinden olan CVD (Chemical – Vapour – Deposition) yöntemiyle yüksek sıcaklıkta işlem yapılmasından doğan şekil değişimi nedeniyle, PVD (Physical – Vapour – Deposition) yönteminin gelişimine imkan sağlanmıştır. Diğer bir deyişle ince kaplamalarla diğer yüzey modifikasyonu ile sağlanamayan yüzey karakteristikleri sağlanabilmektedir.

Malzemelere hem güzel dekoratif görünüm ve hem de aşınmaya dayanıklılık kazandırmak için krom kaplamaların kullanımları yaygındır. Mekanik özelliklerin ön planda olduğu alanlarda sert krom kaplama katları yeğlenir. Hem mekanik hem de dekoratif özellikleri açısından krom kaplama, özellikle otomotiv sanayiinde kullanım alanı bulmuştur (Yıldırım, 1989).

Sol-jel teknolojisi 1970'li yıllarda yoğun bir şekilde ele alınmış ve 1980'li yıllarda bu konuda bir çok çalışma yapılmıştır. Sol-jel yöntemi seramiklerin üretimiyle sınırlı kalırken, sol

-jel kompozit kaplamalar, kaplamacılıkta geniş bir yere sahiptir. Sol-jel kompozit kaplamaları; kalıp ve otomotiv endüstrisinde, tıpta ve elektronik endüstrisinde kullanılır.

Aşınma etkilerinden ileri gelen zararlarla mücadele için, ısıl püskürtme (thermal spray) yöntemi de kullanılır. Bugün için pratikte alevle, elektrik arkıyla, plazma jetiyle, patlamayla ve yüksek hızlı oksijen yakıt (HVOF) püskürtme olmak üzere çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde, elde edilen sıcaklık ve iletilebilen kaplama malzemeleri değişiklik gösterdiğinden her bir ısıl püskürtme yöntemi, farklı uygulama alanlarında aşınma kayıplarına karşı etkili bir yöntem olarak görev yapmaktadır.

Ergitme yöntemlerinden olan “gaz tungsten ark kaynağı (GTA), tozaltı kaynağı (SAW), elektron ışın kaynağı (EBW), lazer ışın kaynağı (LBW) ve plazma ark kaynağı (PAW)” yöntemlerinin biriyle, metalik sert tozlar kullanarak ya da kullanmadan yüzey ergitme şeklinde yüzey modifikasyonu sağlanabilir.

Katı hal kaynak yöntemlerinden olan sürtünme kaynak yöntemi, yüzeyin kaplanması işlemlerinde de kullanılmaktadır. Sürtünme karıştırıcı kaynak yönteminin (friction stir process) kullanılması ile, diğer yöntemlerde ortaya çıkan yüksek sıcaklıkların sebep olduğu ısıl çarpılmaların önüne geçilmiş olur. Çünkü bu yöntemde, işlem sıcaklığı iletilecek malzemenin ergime sıcaklığının altında bulunur.

2. YÜZEY MODİFİKASYONU

Makina parçalarında ortaya çıkan hasarları; insana bağlı hasarlar ve teknik esaslara bağlı hasarlar olmak üzere iki grupta toplamak mümkündür. İnsana bağlı hasarların oranı % 62 ve teknik esaslı hasarların oranı da % 38' dir. Bu % 38'lik kısmın % 11'ni aşınma, sürtünme, korozyon, erozyon, ısı etkiler ve diğer etkenler oluşturmaktadır. Dünyada aşınmanın neden olduğu yıllık kaybın 200 milyar dolar dolaylarında bulunduğu tahmin edilmektedir. Bu yüzden bu zararları önemli ölçüde azaltacak yüzey modifikasyonu yöntemlerine gereksinim duyulmaktadır. Bunlar yüzeyin değişimi ya da yüzeyin kaplanması şeklindedir. Yüzeyin değişimi, yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirerek ya da değiştirmeden ve yine yüzeye iyon bağlanması (iyon implantasyonu) yapılarak sağlanır. Ayrıca bu yöntemlerden farklı olarak yüzeye kaplama yapılarak da zararlı etkilerin önüne geçilebilir. Yüzey kaplama yöntemleri ise; buhar biriktirme, elektrolitik kaplama ve yüzey ergitme yöntemleri olarak üç grupta ele alınabilir. Ergitme yöntemlerinden kaynak işlemleriyle yüzey alaşımlama, yüzey modifikasyonu yöntemlerinde yeni bir teknik olup, yüzey mühendisliğinde geniş bir yere sahiptir. Yine ergitme yöntemlerinden ısı püskürtme (thermal spray) etkili bir yöntem olup, özellikle HVOF (high-velocity-oxy-fuel) püskürtme yöntemi, püskürtme esaslı yöntemler içerisinde avantajları itibarıyla dikkat çekmektedir. Kalın kaplamaların yetersiz kalması, bunların yerine zamanla ince, ancak daha etkin kaplamaların gelişmesine neden olmuştur. Bu tür kaplamaların sağlandığı yöntemler, buhar biriktirme esasına dayanan yöntemler olup, özellikle PVD yöntemi düşük sıcaklıklarda uygulandığından, malzemelerin deformasyon özellikleri bakımından daha geçerli bir yöntem olarak dikkat çekmektedir. Elektrokimyasal yoldan kaplama elde etmek, oldukça eski bir yöntem olup dekoratif özellikleri bakımından teknolojiye yerini almıştır. Özellikle sert krom kaplama hem mekanik özellikleri ve hem de görünümü itibarıyla otomotiv endüstrisinde geniş bir kullanım alanı bulmuştur.

3. YÜZEYİN DEĞİŞİMİ

Yüzey değişimi işlemleri, yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirerek veya değiştirmeden yapılan işlemler olarak iki ana grupta incelenebilir. Kimyasal bileşimi değiştirerek yapılan işlemlerde, malzeme yüzeyinde kimyasal yöntemlerle koruyucu bir tabaka oluşturulur. Kimyasal bileşimi değiştirmeden yapılan işlemlerde ise; bir faz dönüşüm mekanizması ya da yüzeyde ergime sağlamak koşulu ile yüzey değişimi sağlanır.

3.1. Kimyasal Bileşimi Değiştirmeksizin Yapılan Yüzey Sertleştirme İşlemleri

Bir malzemenin yüzeyinin kimyasal bileşimini değiştirmeden sertleştirilebilmesi için malzeme yüzeyinde karbon oranının yeterli olması gerekir. Yüzey sertleştirme işleminin sağlanabilmesi için yüzeydeki karbon oranının en az % 0.30 olması gerekir (Yıldırım ve diğ., 2001). Karbon oranları yüzeyde sertleşme sınırı üzerinde bulunan çelikler; ya fırında ısıtılarak, ya alevle, ya endüksiyon akımı ile, ya da lazerle yüzey sertleştirilirler (Yıldırım, 1984, Yıldırım, 1993).

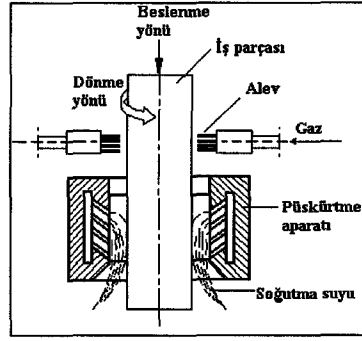
Bu yöntemlerin temel prensibi; öncelikle malzeme yüzeyini ostenitleme sıcaklığına kadar ısıtmak, ostenitleme sağlandıktan sonra belirli soğutma hızı ($^{\circ}\text{C}/\text{sn}$) altında parçayı belli ortamlarında aniden soğutmaktır. Burada önemli olan husus, çekirdek sertleşmesinden kaçınmaktır. Bu yüzden parçaların iç kısımlarının aşırı ısıtılmasından kaçınılmalı ve bunların sadece yüzeylerinde homojen, ancak iç bölgelerine göre daha hızlı, bir ısıtma sağlanmalıdır (Yıldırım ve diğ., 2001).

Ayrıca malzeme yüzeyi ertitilerek de yüzey sertleşmesi sağlanabilir. Bu da genellikle lazer ışını kullanılarak yapılmaktadır. Bu yöntemde kısa süreli ergime ve bunu takip eden soğuk malzeme yüzeyindeki hızlı katılaşma sonucunda, yüzeyde martenzit oluşumu kendiliğinden sağlanır (Yıldırım, 1993).

3.1.1. Alevle Yüzey Sertleştirme

Orta karbonlu çeliklere (% 0.30-0.70 C) uygulanan bu işlemde, çelik yüzeyi ostenit sıcaklığına kadar ısıtılır ve ince bir martenzitik yüzey katı oluşturmak için hızla su verilir (Şekil 3.1). Alevle sertleştirmede malzemenin merkez bölgesinin yapısı ve özellikleri bu işlemde etkilenmediğinden; malzemenin iç kısmının özelliklerini, yüzey sertleştirme işleminden önce uygun bir işlemle iyileştirilmek gerekir. Yüzeyde sert martenzitik yapı elde edilirken, iç kısım ise ferrit + perlitten oluşan bir yapıya sahiptir.

Alevle sertleştirme işleminde gerekli ısı, oksii-asetilen alevi ile sağlanabildiği gibi; hızlı ısıtmak koşulu ile, enerji girdisi yüksek başka bir cihaz yardımıyla da elde edilebilir. Kullanılan cihaz yardımıyla parça yüzeyi otomatik olarak ısıtılıp soğutularak (su verilerek) sertleştirilebilir. Sertleşme derinliği; alev şiddeti, ısıtma süresi veya hareket hızının ayarlanmasıyla kontrol edilebilir. Aşırı ısıtma, hem sertleştirilen tabakanın altında kalan bölgelerde aşırı ölçülerde tane büyümesine, hem de su verme işleminden sonra çatlamaya neden olabilir.



Şekil 3.1. Alevle yüzey sertleştirme (kademeli spin) işleminin prensip şeması

Alevle sertleştirme işlemi; (a) hareketsiz, (b) ileri hareketli, (c) dönme hareketli ve (d) hem dönme hem de ileri hareketli olmak üzere dört yöntemle yapılabilmektedir. Birinci yöntemde parça ve üfleç hareketsizdir. Bu yöntem vana sistemi ve açık ağızlı anahtarlar gibi küçük parçaların bazı bölgelerinin sertleştirilmesinde kullanılır. Hareketli yöntemde, oksii-asetilen üfleci hareketsiz parçanın üzerinde hareket eder. Bu yöntem, torna tezgahı parçaları gibi büyük parçaların yüzeylerinin sertleştirilmesinde uygulanır. Ayrıca büyük dişli çark dişlerinin sertleştirilmesinde de kullanılabilir. Dönme hareketli yöntemde oksii-asetilen üfleci hareketsiz olup, parça dönmektedir. Bu yöntem hassas dişliler, kasnak ve makara gibi dairesel kesitli parçalara uygulanır. Dönme-ileri hareketli yöntemde, üfleç dönen parçanın üzerinde hareket eder. Bu yöntem ise mil ve merdane gibi uzun silindirik parçaların yüzeylerinin sertleştirilmesinde uygulanır.

Bütün bu işlemlerde, yüzeyi gerekli sıcaklığa kadar ısıtılan parçanın tavlanan kısmına aniden su verilir. Bu işlem, genelde parçaya su püskürtülerek gerçekleştirilir. Bazı durumlarda ise parçaya yağda su verilebilir. Su verme işleminden sonra parça 180-200 °C arasındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılıp, havada soğutulmak suretiyle gerilme giderme işlemine tabi tutulur. Bu gerilme giderme işlemi yüzey sertliğini pek fazla değiştirmez. Alevle yüzey sertleştirme yöntemiyle elde edilen sertleşme derinliği 3-4 mm arasında olup, bu değer genelde karbürleme yöntemiyle elde edilen sertleşme derinliğinden daha fazladır (Yıldırım ve diğ., 2001; Savaşkan, 1999).

Avantajları:

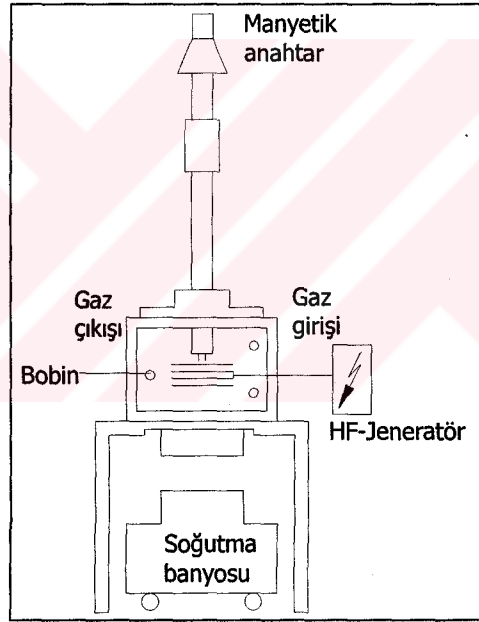
1. Çevreye ve koşullara uyartılabilir,
2. İşyerine taşınarak sertleştirilmek istenen parçalara uygulanabilir,
3. Fırınlara sığmayacak kadar büyük olan parçaların yüzeyleri oksii-asetilen alevi ile sertleştirilebilir (Savaşkan, 1999).

Dezavantajları:

1. Aşırı ısıtma sonucunda parçanın hasara uğrama olasılığı vardır,
2. Sertleşme derinliğini 1.5 mm'nin altına indirmek oldukça zordur (Savaşkan, 1999).

3.1.2. Endüksiyonla Yüzey Sertleştirme

Özel olarak üretilen 10-10000 kHz frekanslı, yüksek frekanslı akım, hızlı bir yüzey ısınması için metale uygulanır. Isıtılan parça herhangi bir soğutma ortamı kullanılarak hızlıca soğutulur. Hızlı soğutulmuş malzeme sert bir yüzey katmanına sahip olur. Yüksek frekanslı akım bir çelik malzeme yüzeyine uygulandığında düşük sıcaklıkta herhangi bir yönde yönelmiş bulunan atomların vektörel yönü hızlı bir şekilde değişir. Malzemenin iç kısmında seyrek olan, ancak yüzeye yaklaştıkça sıklaşan girdap akımları oluşur. Atomların vektörel yönelmesi esnasında, atomlar arasında yüksek sürtünme kuvveti meydana gelir, yüzey sıcaklığı hızla artar ve bir kaç saniyelik bir süre içerisinde ostenitleme sıcaklığı olan 900 °C'ye ulaşır. Sıcaklık belirli bir değere ulaştıktan sonra, atomların vektörel yönelmesi metal yüzeyinde aynı yöndeki dizilime sahip olur. Yüzeydeki hızlı sıcaklık artışı iletim yoluyla metalin çekirdeğine doğru ilerler. Artan frekansla sertleşme derinliği azalır (Yıldırım, 1984; Kayacan ve Çolak, 2004). Şekil 3.2' de endüksiyonla yüzey sertleştirme şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.2: Endüksiyonla Yüzey Sertleştirme Şeması (Pantleon ve diğ., 1999).

Kullanılan bobinin dizaynı da indüksiyonla yüzey sertleştirme için sistem dizaynının dışında diğer önemli bir etkidir. Bobinler, sertleştirilecek yüzeyin biçim ve boyutuna göre dizayn edilir. İnduktans değeri bobinin fiziksel özelliklerine, rezonans frekansına ve sertleştirilecek malzemenin özelliklerine göre belirlenir (Kayacan ve Çolak, 2004).

Bu yöntemle; krank milleri, eksantrik milleri, supaplar ve supaplara ait tahrik milleri ve hareket elemanları, tahrik zincirleri, dişli çarklar, şanzuman parçaları, hadde tamburları,

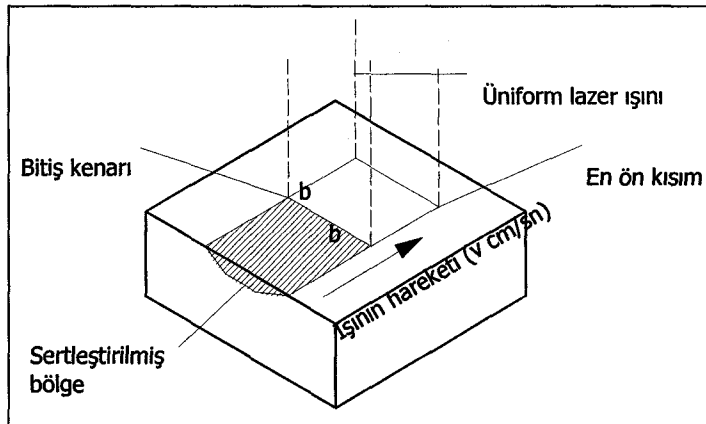
zorlama ve aşınmaya maruz eklem parçaları, raylar, civatalar ve saplama gibi makine parçaları sertleştirilebilir (Yıldırım, 1984).

3.1.3. Lazer Işını ile Yüzey Sertleştirme

Demirli malzemelerin lazer yüzey sertleştirilmesi işlemi dişli ve mil yatağı gibi yüksek gerilim altındaki makine parçalarının mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılan bir yöntemdir. Yüzey sertleştirme uygun koşullarda aşınma direncini, dönüşüm sertleştirilmesiyle malzeme yüzeyinde mevcut olan kalıntı gerilmelerin sebep olduğu yorulma dayanımını artırır. Yüzey sertleştirme yöntemi aslında geleneksel demirli malzemelerin sertleşmesinden farklı değildir. Her iki yöntemde de martenziti oluşturmak için ostenitik alandan su verilerek sertlik ve dayanım artırılır. Yüzey sertleştirmenin, dönüşüm sertleştirmeden tek farkı; yüzey sertleştirmede çok ince bir kat ostenit sıcaklığına kadar ısıtılır ve oradan su verilerek sertleştirilir. Ama malzemenin çekirdeği oluşturan iç kısmı pek değişmez (Sandven, 1991).

Demir içerikli malzemeler ısıyı oldukça iyi iletiklerinden, iş parçasının tüm hacmini aşırı derecede etkilemeksizin parçayı ısıtarak ostenitleme sıcaklığına ulaşmak için iş parçasının yüzeyine yoğun ısı akışı uygulamak gerekir. Bu ısı girdisi, yukarıda belirtildiği gibi, yaygın olarak alevle veya yüksek frekanslı indüktans yardımı ile sağlanır. Ostenitleme sıcaklığına ulaşmak için iş parçasının yüzeyini seçici bir şekilde ısıtmak; arzulanan yüzey sertliğine ulaşmak için de, sıcak yüzeyi uygun bir soğutma ortamında hızla soğutmak gerekir (Sandven, 1991).

Sertleşmiş tabakanın derinliğinin sertlik üzerine etkisi vardır. Fakat bu derinlik nadiren 2,5 mm'den daha fazla olabilir. Düşük ve orta karbonlu çelik gibi sertleştirilebilirliği düşük olan çelikler için derinlik daha düşüktür. Bu değer yumuşak çeliklerde 0,25 mm ve orta karbonlu çeliklerde ise 1,3 mm'dir. SAE 1018 gibi sertleştirilmesi zor olan çeliklerin sertleştirilmesi için lazerle sertleştirme önemlidir. Çünkü lazerle sertleştirmede çok yüksek ısıtma ve soğutma oranı elde edilir. Aynı zamanda elde edilen sertlik değeri geleneksel yöntemlerinkinden daha yüksektir (Sandven, 1991). Şekil 3.3'de lazer ışını ile yüzey sertleştirme işlemi görülmektedir.



Şekil 3.3: Lazer ışını ile yüzey sertleştirme işlemi (Sandven, 1991).

3.1.4. Fırında Sertleştirme

Parçanın dış kısmı, parça bileşimindeki % 0.3-0.7 arasında değişen karbon miktarına göre, Ac_3 sıcaklığının hemen üzerine; iç kısmı ise ferrit-ostenit dönüşümü tamamlayacak şekilde ısıtılır. Beklenme süresi iyi ayarlanmalıdır. Malzeme yüzeyi daha sonra uygun bir ortamda hızla soğutulur. Parça yüzeyi sertleşip aşınma mukavemeti kazanırken, iç kısımda fazla bir değişim olmaz (Yıldırım ve diğ., 2001). Eğer bekleme süresi optimum değerden fazla tutulursa malzemenin yüzeyi yanında çekirdek kısmında da sertleşme görülebilir. Bu da amaca uygun değildir. Bunun için yukarıda bahsedildiği gibi bekleme süresinin çok iyi kontrol edilmesi gerekir.

3.2. Yüzeyin Kimyasal Bileşimini Değiştirerek Yapılan Yüzey Sertleştirme Yöntemleri

Sertleştirme işlemi için yüzeyde yeterli karbon oranına sahip olmayan malzemeler yüzeylerinde bir kimyasal değişim sağlanarak sertleştirilirler. Bunlar genellikle yüzeye karbon, azot ve bor gibi arayer atomlarının geçirilmesi ve metal iyonlarının yüzeye bağlanması şeklinde olmaktadır. Burada modifiye tabakası daha belirgindir ve bazı işlemlerde esas malzemeden keskin sınırla ayrılır. Bu, işlem için bir dezavantaj oluşturabilir. İşlemlerin uygulanmasında; bekleme süresi, parça sıcaklığı, soğutma hızı, soğutmanın şekli ve yüzeye geçirilen malzeme miktarına dikkat edilmelidir.

3.2.1. Karbürleme

Karbürleme, metalin içi ve yüzeyi arasında bir karbon konsantrasyon farkı oluşturarak ostenitlenmiş metal yüzeyine difüzyonla karbon verme işlemidir. Karbürlemeyi kontrol eden iki önemli etmen vardır. Bunlar; yüzeyde kimyasal olarak demirle birleşen karbon içeriği ile parçanın içine yayılan karbonun miktarıdır. Karbürleme genellikle 850 - 950 °C sıcaklıkların arasında yapılabildiği gibi; gerektiğinde, 790-800 °C gibi düşük ve 1090-1100 °C gibi yüksek sıcaklıklarda da yapılabilmektedir.

Karbürleme yönteminde bağımsız karbon düşük karbonlu çelik alaşımının yüzeyine geçirilir. Aktif olan bu karbon; karbürleyici toz, tuz banyosu ve gaz atmosferinden belli ortam ve koşullarda elde edilebilmektedir. Yüzey tabakasına karbonun geçmesi, karbon konsantrasyon farkının varlığı ile sağlanır.

Kuramsal olarak metalin yüzey katı karbürleme sıcaklığı ve etrafını çevreleyen karbon potansiyeli ile belirlenen karbon bileşeni elde edilebilir. Fakat bu bileşenin miktarı metaldeki karbonun çözünürebilirlik sınırını aşmaz. Örneğin, düşük karbonlu bir çelikte 790 °C' de bu oran % 1.05 C'da, 900 °C' de, % 1.2 C'de ve 955 °C' de de 1.4 C değerinde bulunur. Karbonlu çelik için yüksek sıcaklıklar kullanılmasının temel yararı (815 °C' nin üstü), işlem süresini azaltmak, geçişen

madde miktarını ve maddenin yüzeyde reaksiyon oranını artırmaktır. Karbürlemede ilk önce karbonun bir miktarı yüzeyden derine, karbon konsantrasyonu az olan yöne, yani içeriye doğru ilerler. Bu nedenle difüzyon için gerekli konsantrasyon farkı oldukça küçüktür. Yüzeydeki karbon konsantrasyonu zamanla arttığı için, yüzeyden içeriye doğru gidildikçe, parça yüzeyinde artma gösteren karbon oranı ile alaşımın kendi karbon değeri arasındaki fark karbürlemenin etkinliğini kontrol eden en önemli faktör olarak ortaya çıkar. Bu yüzden çoğu karbürleme, denge durumunda olmayan şartlar altında gerçekleşir. Karbürleme yapılan malzemelere son özellikler, karbon difüzyonu ve absorpsiyonu takiben uygun ısıtma işlemi ile kazandırılır. Metalin içerisinde karbonun yayılımı Fick yasaları uyarınca gerçekleşir (Bargel ve Schulze, 1980).

Difüzyon için iki farklı Fick yasası bilinmektedir. I. Fick yasası:

$$J = -D (\partial c / \partial x)$$

Burada J: akış veya birim zamanda belli bir kesitten geçen madde miktarını, D: difüzyon katsayısını ve $\partial c / \partial x$ de konsantrasyonun yerel değişimini göstermektedir. Konsantrasyon yerel değişiminin karakteristikleri ve difüzyon katsayısı değerleri, ostenit fazındaki karbonun geçişme hızına bağlıdır. Difüzyon katsayısı karbon konsantrasyonu ve sıcaklığın bir fonksiyonu olup, Arrhenius eşitliği ile verilir:

$$D = D_0 \cdot \exp (-A_E/RT)$$

Bu eşitlikte difüzyon katsayısı D, difüzyon sabiti D_0 , aktivasyon enerjisi A_E , gaz sabiti R ve mutlak sıcaklık da T ile gösterilmiştir.

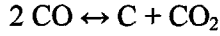
Karbon difüzyonunun yönü, alaşım içerisinde yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye doğrudur. Derinlik, sabit sıcaklık için belirlenebilir ve Tammann eşitliği ile zamanın bir fonksiyonu olarak verilir:

$$d = \sqrt{2 kt}$$

Burada d difüzyon derinliğini, t karbürleme süresini ve k ise malzemeye bağlı bir sabiti göstermektedir (Böhm, 1968; Bargel ve Schulze, 1980).

Toz ile Karbürleme

Yüzeyi sertleştirilecek parçalar karbürleyici toz ile karıştırılarak hava geçirmeyen kapalı ve kille sıvanmış sementasyon kutularında 900 °C'de 4-4,5 saat kadar tutulur. Karbürleyici toz odun kömürü, kok ve kemik tozu ile alkali bileşiklerden oluşur. Toz halindeki tanelerin ortalama irilikleri 3-6 mm'dir. Yüksek sıcaklıklarda oksijenle fakir atmosferde CO ve CO₂' den oluşan bir gaz karışımı elde edilir. Baryum oksit ve baryum karbonat gibi alkali bileşikler karbürizasyonu hızlandırıcı katalizör maddelerdir. Yüksek sıcaklıklarda Boudouard reaksiyonu uyarınca;



yüzeyde açığa çıkan aktif karbon difüzyonla metal yüzeyine geçişerek çeliğin bileşimine girer. Önceleri yüzeyde hızla yükselen karbon miktarı daha sonra gittikçe hızını kaybeder ve yaklaşık % 0,7-0,8 C değerine ulaşır.

Yüzeye karbon geçiştirme ve yüzey sertleşme olmak üzere iki ayrı çalışma kademesiyle gerçekleştirilen ve kolay bir işlem olan tozla karbürizasyonun, pratik ve fazla ekonomik olduğu söylenemez. Ayrıca parça yüzeyinde önemsiz miktarda da olsa tufallaşma görülür. Uygulamada parçalara doğrudan doğruya su verilememesi de, yöntemin başka bir dikkate değer dezavantajıdır (Yıldırım ve diğ., 2001).

Tuz Banyosunda Karbürleme

Tuz banyosu karbürizasyonunda, iş parçaları belli bir süre ön ısıtıldıktan sonra 850-930 °C sıcaklıklar arasında siyanürlü alkali tuz eriyikleri içerisine daldırılır. Tuzların bileşiminde karbon taşıyıcı olarak NaCN, ayrışmayı frenleyici olarak görev yapan klorürler (özellikle KCl), aktifleyici olarak da sodyum, stronsiyum ve baryum tuz bileşikleri bulunur.

Karbürizasyon sıcaklığında siyanür parçalanarak karbon ve az miktarda da azot verir. Tuz banyosunda parçaların bekletilme süresi kısadır. Karbürizasyon bittikten sonra parça doğrudan doğruya sertleştirilebilir. Siyanürlerin zehirli olmaları nedeniyle tuz banyosunun yüzeyi grafit ile örtülmelidir.

Tuz banyosunun konmasında en dayanıklı ocak, saf bakır levhalarla kaplı olan ocaktır. Bunun dışında seçilecek ocaklar siyanür tuzları tarafından kısa sürede kemirilerek kullanılmayacak duruma gelirler (Yıldırım ve diğ., 2001).

Gaz Atmosferinde Karbürleme

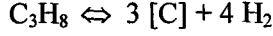
Gaz atmosferinde karbürleme; iş parçası yüzeyi ile karbon içeren gaz ortamından parça yüzeyine karbon elementinin transferiyle yüzeye karbon geçiştirme işlemidir (Edenhofer ve diğ., 2001). CO ve H₂ içeren gazlar kullanılarak yapılan yöntemde reaksiyon:



Atmosferin karbon aktivitesi

$$a_c = (p_{\text{CO}} \cdot p_{\text{H}_2}) / (K p_{\text{H}_2\text{O}})$$

Karbürlemede karbon monoksitle birlikte metan ve propan gazları gibi saf hidrokarbon bileşimli gazlar da kullanılabilir. Bu durumda karbon transferi; hidrokarbon moleküllerinin yüzeyde birikimi ve karbon verecek şekilde kimyasal ayrışması ile gerçekleşir:



Karbürizasyon için kullanılacak gaz; SO_2 , CO_2 ve H_2O gibi zararlı bileşiklerden arınmış doğal gaz veya jeneratör gazı olabilir. Ancak bu gaza belirli bir oranda propan (C_3H_8) katılarak karbürleyici etkinin artırılması her zaman yararlı olmaktadır.

Gazla karbürizasyonda işlem süresi oldukça kısadır. Parçalar doğrudan sertleştirme ortamına alınabilir. Karbürleme derinliği ve parça büyüklüğü arzu edilen şekilde seçilebilir. Bu avantajlarının yanı sıra gaz üretim ve ayarlama tesislerinin gerekmesi, CO gazının zehirliliği gaz atmosferiyle karbürlemenin dezavantajlarını oluşturur (Yıldırım ve diğ., 2001; Edenhofer ve diğ. 2001).

Plazma ile Karbürleme

Plazma ile karbürleme işlemi, plazma ile nitrürleme işlemi ile hemen hemen aynıdır. Sadece kullanılan gaz ve gerilim değeri farklıdır. Bu işlemde doğru akım kullanılmaktadır. Gaz basıncı 1-20 mmHg olup, anot ve katot arasına genellikle 1000 Volt'luk bir gerilim uygulanarak plazma oluşturulur. Karbürleme gazı ise, genellikle bir hidrokarbondur. Karbürleme işlemi, ostenitik termokimyasal işlem olarak sınıflandırılabilir. Çünkü işlem tamamen ostenitik şartlarda meydana gelmektedir. Bu işlem 850-1050 °C arasındaki sıcaklıklarda yapılmaktadır. İşlem sonrası malzemenin ısı etkisiyle çarpılma tehlikesi hemen hemen yoktur, çünkü soğuma vakum ortamında gerçekleşmektedir. Parçaların geometrisi homojen tabaka elde edilmesi için önemli değildir, her geometriye sahip malzemede homojen kalınlık elde edilebilir. Hatta işlem parametresinin iyi seçilmesi ile 0,5 mm çapındaki bir delik bile karbürlenebilir (Staines, 1985). Plazma ile karbürleme; işlem süresinin kısa olması, az çarpılma etkisi göstermesi ve yapının iyi kontrol edilebilmesi gibi avantajlarından dolayı endüstride çok geniş uygulama alanı bulmuştur (Buytoz, 2004).

3.2.2. Nitrürleme

Nitrürleme işlemi, çelikler ferritik (KHM) yapıda iken, yüzeylerine atomik azot (N) geçirtilerek difüzyon yoluyla malzeme yüzeyinde nitrür katı oluşturma esasına dayanan bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Azotun 0.71 Å (Angström) olan atom çapı ile azot, 0.77 Å atom çapına sahip olan karbona nazaran demir kafesi içerisine daha kolay nüfuz ettirilebilir. Azotun alınması, yüksek sıcaklıklarda ostenit içerisinde çok hızlı olur. Oluşan nitrürlerin ($\epsilon\text{-Fe}_{2\ldots4}\text{N}$, $\gamma\text{-Fe}_{2\ldots4}\text{N}$, Fe_3N_4 , Fe_3C , Si_3N_4 , Fe_2O_3) dış cidarda yığılması, yüzeyde kırılğan bir tabakanın oluşmasına sebep olur. Ayrıca ostenit-ferrit dönüşümünden dolayı hacim değişmesi de meydana gelir ve dolayısıyla bu tabaka parçalanarak dökülür. Bu nedenle ostenitik yapıda (KYM) değil, ferritik (KHM) yapıda azot geçirtilir. İşlem sıcaklığı genellikle işlem gören çelik tipine ve arzu edilen derinliğe bağlı olarak 1-

100 saat süreyle 495-595 °C' ler arasında yapılır. Bu şartlar altında alüminyum, krom, molibden ve vanadyum gibi alaşım elementleri içeren çeliğin yüzeyinde veya yüzeyin hemen altında nitrürler oluşur.

Nitrürasyon işlemi için doğrudan doğruya amonyak gazı (NH₃) kullanıldığı gibi, bu amaç için azot verici siyanürlü tuz banyolarından da (KCN, NaCN esaslı tuzlardan) yararlanılır. Nitrürlenmiş katmanlar karbürleme ile üretilen katmanlardan daha serttir ve nitrürleme sıcaklıklarına kadar oldukça dengelidir. Nitrürlenmiş çelikler mükemmel aşınma ve sürtünme direncine sahiptir ve özellikle temas halinde hareket eden parçalar arasında sürtünme ile oluşan ısı ve dirence karşı dayanım göstermeleri için tasarlanırlar. Nitrürleme ile yüzeyi sertleştirilmiş parçalara örnek olarak; kam milleri, dişliler, delme parçaları, iğneler, dişli çarklar ve buhar vanaları verilebilir.

Nitrürleme sertliğinin bir dizi avantajları vardır. Bunlar;

- Nitrürleme işleminden sonra tavlama, sertleştirme ve menevişleme yapmaya ihtiyaç yoktur. Çünkü sertlik, doğrudan nitrürleme esnasında oluşur.
- Nitrürleme sertliği uygulanmış makina elemanlarında çekme olayı olmaz. Çünkü elemanlar sadece 550 °C'ye kadar ısıtılır.
- Nitrürleme tabakasının kalınlığı, 550 °C'ye kadarki ısıtma esnasında değişmeden kalır (meneviş dayanımı).
- Nitrürlemeyle elde edilen kat; gayet sert, aynı zamanda aşınmaya dayanıklı ve kayma özelliği yüksek olan bir kattır.

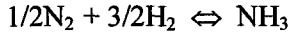
Nitrürleme sertliğinin sakıncası ise, yüzeyin aşırı zorlamasında sertleşen tabakada pul pul dökülmenin görülmesi ve nitrürlenmiş tabakanın iş parçasına çok az bir kuvvetle bağlanmasıdır.

Nitrürleme, 480-585 °C sıcaklıklar arasında çelik ve demir esaslı alaşımlara azotun verilmesiyle yapılan bir termokimyasal yüzey işlemidir (Schaaf, 2002). Nitrürlemenin prensip olarak amacı; yüksek yüzey sertliği elde etmek, aşınma direncini geliştirmek, yorulma ömrünü artırmak ve iyi bir korozyon direnci sağlamaktır. Çeşitleri ise,

1. Gaz nitrürleme yöntemi,
2. Tuz banyosunda nitrürleme yöntemi,
3. Plazma (iyon) nitrürleme yöntemi,

Gaz Nitrürleme

Karbonitrürleme ve nitrokarbürleme ile birlikte gaz nitrürleme yöntemi, endüstriyel yönden yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Gaz nitrürlemede azot aktivitesini artırmak için amonyak ya da amonyak/hidrojen karışımları kullanılır. Amonyak Haber-Bosch reaksiyonu uyarınca 500-600 °C'lerde azot ve hidrojene ayrışır:



Molar Gibbs serbest enerjileri G denge şartı ile,

$$\Delta G = \Delta G_{NH_3} - \frac{1}{2} \Delta G_{N_2} - \frac{3}{2} \Delta G_{H_2} = 0$$

Burada ΔG azot gazı için,

$$\Delta G_{N_2} = \Delta G^\circ_{N_2} + RT \ln p_{N_2}$$

Her bir gaz bileşeninin kısmi basıncı p_i ve standart Gibbs serbest enerjisi ΔG° yerine konursa,

$$\Delta G^\circ = \Delta G^\circ_{NH_3} - \frac{1}{2} \Delta G^\circ_{N_2} - \frac{3}{2} \Delta G^\circ_{H_2} = -RT \ln (p_{NH_3}/(p_{N_2}^{1/2} \cdot p_{H_2}^{3/2}))$$

Sonuç olarak azot aktivitesi matematiksel olarak,

$$\frac{1}{2} RT \ln p_{N_2} = \Delta G^\circ + RT \ln (p_{NH_3}/p_{H_2}^{3/2})$$

Amprık denklem,

$$\Delta G^\circ [J/mol] = -45403 + 128.94 T + 10.785 T \ln (T) \text{ elde edilir.}$$

Amonyak yukarıdaki reaksiyon uyarınca kendisini oluşturan azot ve hidrojen elementlerine ayrıştıktan sonra, azot katalitik reaksiyon yolu ile metal yüzeyine geçişir. Azotun yüzeyde birikimi (adsorbsiyonu) ile, difüzyon ve reaksiyon olayları bu birikime katılır, demir nitür bileşikler dıştan içe doğru bir azalma gösterecek şekilde yüzeyde oluşur.

Nitrürlenmenin uzaması, demir nitürlerin geçici kararlı olmalarından dolayı gözenek oluşumuna neden olabilir. Malzeme daha yüksek sıcaklıklarda nitrürlendiğinde, azot yeniden ayrışmaya eğilim gösterdiğinden bu gözeneklerin oluşması kaçınılmazdır. Nitrürlenmiş tabakalarda gerilmelerden dolayı hacim değişimleri sonucu olarak, istenmeyen çatlaklar ortaya çıkabilmektedir.

Bazı araştırmacılar gaz nitrürlenme işlemi sırasında karışıma ilave edilen oksijenin yararlı etkisi olduğunu, ancak oksijen içeriği kontrollerinin çok hassas yapılması gerektiğini belirlemişlerdir (Spies ve diğ., 1998).

Buijnsters ve arkadaşları (2003), 800°C' de NH_3-H_2 atmosferli ortamda 1, 4, 24, 48, 72, 120 ve 142 saat gibi nitrürlenme sürelerinde saf kromun nitrürlenme davranışını incelemişlerdir. Artan nitrürlenme sürelerinde, nitür yüzeyinde gevrek ve gözenekli yapıdaki yüzey tabakasının arttığını gözlemişlerdir. Nitür yüzey tabaka sertliği 1200-1400 HV olarak ölçülmüştür. Artan nitrürlenme ve zamanına bağlı olarak, yüzeyde oluşan CrN fazında kırılmanın arttığı görülmüştür. 120 saat süreyle nitrürlenmiş kromda $Cr_2N-CrN/Cr_2N-Cr(N)$ li iki tabakalı yapının oluştuğu, 142 saat için, yalnızca CrN üçüncü tabakanın da oluştuğu tespit edilmiştir.

Tuz banyosunda nitrürleme

Yüksek miktarda siyanat içeren siyanürlü tuz banyolarında yapılır. Burada, yüksek sıcaklıklarda siyanürden (CN) karbon ayrışmasına benzer olarak, düşük sıcaklıkta azot ayrıştırılarak çeliğe verilir.

Banyo nitrürlemenin gaz nitrürlemeye nazaran üstün tarafı, banyo nitrürlemede 500 °C gibi düşük sıcaklıklarda çalışılmasına karşın, yüzeyde daha yüksek sertliğe ulaşılabilmesi ve küçük nüfuziyet değerlerinde, aynı derinliğe daha kısa sürede ulaşılabilmesidir. Parçaların tuz banyolarına daldırılıp alınması da, gaz fırınlarındaki nitrürlemeye nazaran daha kolaydır. Ayrıca, koruyucu kaplama yapılmadan bölgesel olarak kısmi daldırma yoluyla, bölgesel nitrürleme de yapılabilir. Ancak banyoda nitrürleme işleminde hızlı ısınmanın, deformasyon etkilerini artırması ve boyut değişimine yol açması tehlikesi vardır. Hız çeliklerinin dışındaki çelik türlerinde, yüksek yüzey sertliğine ulaşmak amacıyla banyoda nitrürleme işlemi pek yapılmaz.. Bu yöntemle daha çok, yüksek aşınma dayanımlı yüzeyler elde etmek istenir ya da değişen çekme, basma ve eğilme gibi zorlanmalarda yüksek yorulma ömrünün sağlanmasında tercih edilir.

Banyo nitrürlemede, yalnızca azot difüzyonu değil, aynı zamanda karbon difüzyonu da olacağından, ε-nitrür yerine ε-karbonitrür bileşiği oluşur. ε-karbonitrür, karbon atomlarının da bünyeye alınmasıyla oluşmaktadır. Yapıya karbonun girmesi, aşınma dayanımını yükseltir. Aşınmaya dayanıklı, fakat ince olan karbonitrür bağlantı tabakası azot yayılımını yüksek sıcaklıklarda engeller. Azot bu bölgede 570 °C gibi daha yüksek sıcaklıklarda nitrür olarak bulunmaz. Aksine ferrit kafesine yerleşmiş şekilde bulunur. Azot atomu, ferrit kafes aralığından büyük olduğu için kafeste biraz genişleme olur. Bu bölgede difüzyon biraz daha hızlı seyreder, 570 °C sıcaklıkta 10 saatte 0,5-0,8 mm derinliğe ulaşılır. Bu durum, özellikle nitrür oluşturan alaşım elemanları fazla olmadığında meydana gelir. Bundan dolayı banyo nitrürlemesi, hem alaşımsız ve hem de düşük alaşımlı çelikler için uygundur. Nitrür oluşturan elemanların miktarı artıkça, difüzyon süresi artar; ferrite yerleşen azot miktarı ise azalır; ancak bu durum nitrürleme çeliklerinde fazla önem taşımaz.

Nüfuz eden azotun ferrit kafesine yerleşmesi, önemli bir sertlik artışı sağlamaz. Diğer yandan aşınma direnci oldukça artar. Eğer çelikler, bu yumuşak nitrürlemeden sonra örneğin su içerisinde hızlı soğutulursa, azot çözülmüş olarak kalır. Yavaş soğumada ise, iğnesel formda demirnitrit olarak çökeler. Çelik hızlı soğutmadan sonra yaşlandırılırsa, çok yavaş olarak ince yapılı çökeltme meydana gelir. Bu çökeltme, biraz ısıtma ile hızlandırılabilir. Isıtma sıcaklığı ne kadar yüksekse, çökeltme o kadar çabuk olur ve o kadar kaba iğneler oluşur. Yüzeyin aşınma direnci sıcaklıkla ve zamanla artar. Eğer kaba iğneler oluşursa, aşınma direnci tekrar azalır. Aşınma direncinin dışında, değişen eğme dayanımı vb. sürekli dayanım değerleri, yumuşak nitrürlemede anlam taşır. Alaşımlı çeliklerde bu etki, azotun alaşım elemanı ile bağlantı yapmadığında görülür. Yorulma ömrünün büyüklüğü; malzemeye

uygulanan, nitrürleme sonrası ani soğutma ve yaşılandırma işlemlerine bağlıdır. Ferrit kafesinde çözünmüş azotun nitrür iğneleri şeklinde çözünmesi, sıcak işlemdekine benzer şekilde, soğuk şekillendirme ile de olur. Değişken zorlamada bu olay ortaya çıkar. Oda sıcaklığında yorulma ömrünün yükselmesi hemen zorlamanın başlangıcında olur ve bu anda nihai değere ulaşır. Normal mikroskop altında yapıda nitrür çökmesi gözlenemez. Daha çok azot atomları ve bağlantı atomlarının küreselleşmesi mevcuttur.

Banyo nitrürleme % 25-50 siyanür ve % 50 siyanat içeren siyanür banyolarında yapılır. Parçaların daha önce ıslah edilmesi yararlıdır. Banyo sıcaklığı genellikle 500-580 °C arasındadır. Nitrürleme süresi, normal olarak 2 saattir. Nitrürlemeden sonra, parçalar suda ani soğutulurlar. Büyük gerilmelerden sakınmak için 80 °C kadar ısıtılmış banyolarda kullanılabilir. Parçalar, yüksek sıcaklıklarda uzun süre bekletilmemelidirler. Ayrıca, havada soğutma da uygulanabilir. Bu nitrürleme, yüksek yüzey basınçlarının mevcut olmadığı, özellikle aşınmaya dayanıklılık istenen yerlerde kullanılır (Topbaş, 1998).

Plazma (İyon) Nitrürleme

Plazma veya iyon nitrürleme, malzemenin yüzeyinde difüzyon yoluyla azot tabakasının oluşumunu sağlamak amacıyla elektrik boşalma teknolojisinin kullanıldığı bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Vakum ortamındaki yüksek gerimli elektrik enerjisi, plazmayı oluşturmak amacıyla kullanılır. Bu iyon bombardımanı iş parçasını ısıtır, yüzeyi temizler ve aktif azot oluşumunu sağlar. İyon nitrürleme daha iyi kılif derinliği ve tabakanın üniformluluğunun kontrolüne sahiptir. Bu yöntem parçada, diğer nitrürleme yöntemlerinden (örneğin; gazla nitrürlemeden) parçada daha az bir çarpılma etkisi gösterir. Gaz nitrürleme ile iyon nitrürleme arasındaki en büyük fark; iş parçasının yüzeyinde azotun oluşumunu sağlamak için kullanılan mekanizmadır (O'Brien, 1991).

Azot konsantrasyonu iş parçasının yüzeyine doğru artarken; azotun çözünebilirlik sınırı aşıldığında, çok ince ve eş uyumlu (koheran) çökelekler oluşur. Bu çökelekler, hem tane sınırlarında ve hem de kendi kendine tanelerin kafes yapılarında oluşabilirler. Demir nitrürleri ve diğer oluşumları içeren bu çökelekler, kafes yapısını ve kristal dislokasyonlarını çarpık yapı haline dönüştürür. Bu oluşum da malzemenin sertliğini artırır (O'Brien, 1991).

Dişliler, krank milleri, silindir gömlekleri ve pistonları içeren, aşınma etkileri altında bulunan çeşitli alaşımlı çelik ve dökme demir aşınma parçalar; plazma nitrürleme için mükemmel uygulama alanlarıdır. Örneğin, toz metalurjisi ile üretilmiş (P/M) transmisyon dişlilerinin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla plazma nitrürleme işlemi kullanılmaktadır. Genel olarak kılif derinliği ve beyaz tabaka bileşimi, nitrürlenmiş parçanın işlem göreceği ortama göre belirlenebilir.

İyon nitrürlemenin kullanımının çok büyük bir gelişme gösterdiği alanlardan biri de yakıt sistemleri endüstrisidir. Yakıt enjeksiyon sistemlerinde kullanılan parçalar, yakıtın meydana getirdiği erozif aşınmaya ve yakıt basıncının gösterdiği çevrimden dolayı yorulmaya maruz kalır. Plazma (iyon) nitrürleme her iki etkiye karşı direnci artırır.

Beyaz tabakanın hem sertlik hem de yorulma direnci göstermesi iyon nitrürlemenin takım ve kalıp endüstrisinde kullanımına olanak tanımıştır. Isıl yorulma ve yapışma etkisiyle bozulan sıcak iş kalıpları; özellikle iyon nitrürleme işlemi, su verme ve temperleme işlemlerinin kombinasyonu ile bu etkilere karşı dirençli hale gelirler (O'Brien, 1991).

3.2.3. Karbonitrürleme

Karbonitrürleme, karbürleme ve nitrürleme işleminin kombinasyonu şeklinde olup, karbürleme banyosuna benzeyen tuz eriyikler içerisinde azotun karbon ile birlikte sertleştirilecek çelik yüzeyine nüfuz ettirilmesi işlemidir. Karbonitrürleme genellikle karbürlemeden daha az bir sürede ve düşük sıcaklıklarda yapılır ve bu nedenle de yüzeyde karbürlemeden daha ince bir sertleştirilmiş katman oluşturulur. Seçilecek düşük sıcaklık metal yüzeyine daha az karbonun, buna karşılık daha fazla azotun geçişmesine neden olur. İşlem süresi genellikle 1-1,5 saati aşmaz.

3.2.4. Borlama

Borlama, borun metal yüzeyine difüze edilmesi sonucu oluşan bir termokimyasal işlemdir. Borlama işlemiyle oluşan borürler, alt tabaka çeliğinin aşınma ve tribolojik davranışlarını geliştirir. Borlanan çeliklerin erozif ve korozyon ortamlarına karşı çok dirençli olduğu bulunmuştur. Yirminci yüzyılın başlarından itibaren uygulanmaya başlanan borlama ile; çok sert, düşük sürtünme katsayısına sahip, yüksek sıcaklık ortamına dayanımı fazla ve korozyona dirençli malzeme yüzeylerinin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bir termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemi olan borlamada, bor atomları metal yüzeyine termokimyasal olarak yayınarak, çok sert bir bor tabakası oluştururlar. Bu yöntem, yaklaşık 900-1100 °C sıcaklıkta, değişik ortamlarda (katı, sıvı, gaz veya plazma) alaşımsız ve alaşımlı çeliklere, dökme demirlere, demir dışı metal (Ni, Co, Mo, Ti) ve alaşımlarına, bu alaşımların toz metalurjisi yöntemiyle üretilen tozlarına, bazı süper alaşımlar ile sermetler gibi birçok malzeme grubuna uygulanabilir. Yapı çelikleri, sementasyon çelikleri, temperlenmiş çelikler, takım çelikleri, korozyona dayanıklı çelikler, gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir, sinterlenmiş demir ve çelikler borlama işlemi için uygun malzemelerdir. Bu malzemelerden yapılan pimler, burçlar, fan kanatları, pompa milleri, püskürtme ağızlıkları, dökümle üretilmiş gömlekler, valfler, pres kalıpları, enjeksiyon pistonları, soğuk hadde çekme kalıpları, rulman bilyaları, supaplar, elek saçları, vana gövdeleri, ekstrüzyon kalıbı parçaları, dişli çarklar, tekstil makinelerinin parçaları ve yine bazı diğer kalıplar borlama işleminin başarıyla uygulandığı makine parçalarıdır.

Endüstriyel borlama; çelikler, dökme demirler; nikel, kobalt, titanyum ve molibden esaslı alaşımlar ile sermet karbürleri gibi bir çok demir esaslı ve demir dışı metallere uygulanabilir. Çelik yüzeyinde oluşan bor tabakası, aşınma ve korozyona karşı çok dirençli olup, yüksek sıcaklıklarda da oldukça serttir.

Borlama, yüksek sıcaklıklarda yüzeye bor atomlarının difüzyonu ile malzeme yüzeyini zenginleştiren bir termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemidir. Bu yöntem, fiziksel ve kimyasal

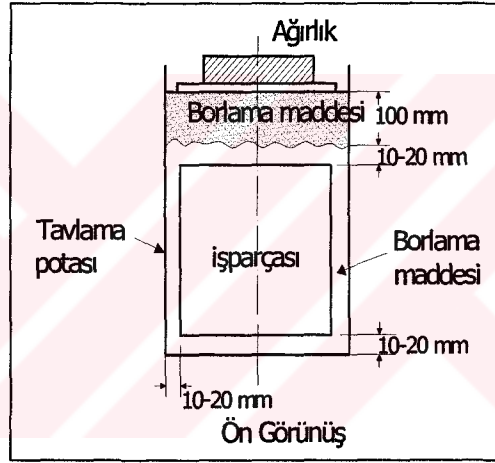
karakteristikleri yönünden karbürleme ve nitrürleme gibi diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine benzerlik gösterir. Borlama demir ve alaşımlarının tümüne, nikel alaşımlarına, titanyum alaşımlarına ve sinterlenmiş karbürlere başarılı bir şekilde uygulanır. Borlanan çelikler, yüzey sertliği ve aşınma direncinin artırılmasıyla kendisini belli eder. 1–8 saatler arasında değişen periyotlar için 800–1000 °C sıcaklıklarında demir esaslı malzemeler borlandığı zaman, malzemenin yüzeyinde (Fe₂B-FeB) veya Fe₂B’ dan oluşan, yaklaşık 2000 HV sertliğinde bir bor tabakası üretilir. Bor tabakası oluşumu; borlama sıcaklığı, işlem zamanı ve borlanan malzemenin özelliklerine bağlıdır. Bor katı, sıvı veya gaz durumunda olabilir. Katı durumunda borlama avantajlıdır. Bu yöntem, işlemin kolay olması ve pürüzsüz bir kaplama yüzeyinin elde edilmesi mümkün olduğundan, geniş bir kullanım olanağı sağlar. Katı durumda borlama, kutu sementasyonuna benzer bir şekilde, sıkı kapaklı kutular içerisinde ya da soy gaz atmosferi altında da yapılabilir. Borlama için malzeme ısıl rezistanslı kutu içindeki toz içine daldırılır. Malzeme yüzeyine bor atomlarının çok daha iyi yayınması için bor yaşlandırıcı ile malzeme arasında geniş bir yüzey temasının gerçekleşmesi arzu edilir. Toz tane boyutu, borür tabakasının oluşumunda önemli bir faktördür. Diş biçimli yapı borür tabakasının karakteristik bir özelliğidir. Düşük karbonlu çelikler ve düşük alaşımlı çeliklerde daha güçlü dişe benzer yapı oluşur. Alaşımlı çeliklerdeki alaşım elementlerinin oranına bağlı olarak dişe benzer yapı daha azdır. Esas metal ile borür tabakasının birleşmesi diş biçiminde olduğunda, tabaka ve ana metal arasındaki bağ daha iyidir. Kalınlığın artmasıyla borür tabakasının kırılabilirliği artar. Borlama yönteminin diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine göre avantajı; yüzey tabaka sertliğinin yüksek olması, kırılma katsayısının düşük olması, borlama sonrası ayrıca bir ısıl işleme gerek olmaması, bazı asit, metal çözeltilerine ve yüksek sıcaklıkta oksidasyona karşı dirençli olmasıdır. Borlanan çelikler 1000 °C ve üstündeki sıcaklıklarda tribolojik özelliklerini kaybetmeksizin oksidasyona ve aşınmaya dirençlidirler (Meriç ve diğ., 2000).

Borlama yöntemleri: katı ortamda borlama, sıvı ortamda borlama, gaz ortamda borlama, plazma ortamda borlama ve akışkan yataklı ortamda borlamadır.

Katı Ortamda Yapılan Borlama

En yaygın olarak kullanılmakta olan bu yöntem, taban malzemesi üzerine bor veya borkarbür bileşiminde aktivatörlerin paketlenmesiyle yapılan borlamadır. Yöntem yalnızca küçük boyutlu parçalara uygulanabilmektedir. Demir dışı alaşımlardan Ti, Ni, Ta esaslı alaşımlar bu yöntemle borlanabilmekte ve bunların borürleri 3200 HV sertliğe kadar ulaşabilmektedir (Bhushan ve Gupta, 1991). Bu yöntemin işlem parametrelerinin kontrol yeteneğinin çok kötü olması, otomasyonun mümkün olmayıp elle çalışma zorunluluğu ve atık ürünlerin çevreye verdiği zarar gibi dezavantajları mevcuttur (Cabeo ve diğ., 1999; Küper ve diğ., 2000; Kaestner ve diğ., 2001). En yaygın kullanım şekli olan paket borlama olarak bilinen katı borlamada paket karışımları malzemenin cinsi de dikkate alınarak farklılık arz eder. Borlama, borlama etkeni (SiC’ le ince toz haline getirme), aktivatör (BF₃

gazı) ve bir oksit azaltıcı (silika: asitle sulandırılmış kum) aşamalarını içerir (Bhushan ve Gupta, 1991). Katı ortam borlamasında yüzey oldukça temiz çıkmakta, ayrıca temizleme işlemine gerek kalmamaktadır. Borlama sıcaklığı, borlanacak malzemenin bileşimine bağlı olarak belirlenmektedir. Gri dökme demir, tungsten karbür ve diğer karbürler hariç bu sıcaklık 800-1050 °C arasındadır. Gri dökme demir 850-880 °C'ı geçmeyen sıcaklıklarda borlanmalıdır. Tungsten ve diğer karbürler 900 °C'ın altındaki sıcaklıklarda borlanmalıdır (Fichtl ve diğ., 1980). Borlama işlem süresi 1 ile 8 saat arasındadır. Borlanmış tabakanın sertliği ve kalınlığı da borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişmektedir. Borlama işleminin en önemli üstünlüklerinden biri de, borlamadan sonra matris malzemesine istenilen ısıl işlemin yapılabilmesidir. Matris malzemesinin mekanik özelliklerini iyileştirmek için yapılacak ısıl işlemlerin koruyucu gaz, vakum veya nötr tuz banyolarında yapılması önerilmektedir. Bu ısıl işlemler, eğer katı borlama yapılmışsa borlama kutusuyla birlikte, borlama işleminin ardından hızlı soğutma şeklinde yapılabilir. Ayrıca ılık banyo ve basınçlı gazda hızlı soğutma, ardından temperleme, ostenitleme veya matris malzemesini homojenleştirme gibi işlemler uygulanabilir. Şekil 3.4'de katı ortamda borlamanın prensibi görülmektedir.



Şekil 3.4: Katı ortamda borlamanın prensibi (Sinha, 1991)

Sıvı Ortamda Yapılan Borlama

Metalik malzemelerin bor bileşimli ergimiş tuz banyosuna daldırılmalarıyla yapılmaktadır. Ergimiş tuz banyosu değişik oranlarda B_4C , BaO , KCl , $NaCl$ bileşiklerini içerir. BaO ilavesi, difüzyonu önemli ölçüde iyileştirir. Oluşan demir-bor tabakalarının tipik kalınlıkları 100-200 μm ' dir (Bhushan ve Gupta, 1991). Bu yöntemin kullanımını; zehirlilik, patlayıcılık, doğa ve çevresel kirlilik gibi dezavantajları sınırlandırmaktadır (Cabeo ve diğ., 1999; Yoon ve diğ., 1999). Sıvı ortam borlamasında, işlemin sonunda borlayıcı ortam bileşenlerinin parça yüzeyine yapışması ve bunların temizlenmesi için ek bir işlem gerekmesi sıvı borlamanın bir olumsuzluğudur.

Gaz Ortamında Yapılan Borlama

Bor hidrürlerin termal parçalanması sonucu elde edilen buharla yapılan borlama işlemidir. Bu işlemde sıcaklık yükseltilebilir ve daha homojen difüzyon tabakası elde edilebilir. İşlem özellikle karışık şekilli parçaların borlanması ve homojen tabaka elde edilmesi istendiğinde tercih edilen bir yöntemdir (Bhushan ve Gupta, 1991). Ancak gaz ortamda borlama işleminde mevcut olan zehirlilik, patlama tehlikesi, doğa ve çevreyi kirletme gibi dezavantajlarının varlığı yöntemin kullanımını sınırlamaktadır (Cabeo ve diğ., 1999; Yoon ve diğ., 1999).

Plazma Borlama

Hem $B_2H_6-H_2$, hem de BCl_3-H_2-Ar karışımı plazma borlamada başarıyla uygulanır. Ancak; ilk gaz karışımı, katı ve sıvı borlama yöntemlerinin de mümkün olduğu $600\text{ }^{\circ}C$ gibi nispeten düşük sıcaklıklarda çeşitli çeliklerin üzerinde borür tabakası elde etmek için uygulanabilir. BCl_3-H_2-Ar gaz karışımında BCl_3 konsantrasyonu iyi kontrol edilerek daha iyi mikrosertlik ve özellik kombinasyonu elde edilebilir.

Çift faz tabakası gözle görünür bir gözenekliliğe sahiptir. Ancak bu gözeneklilik BCl_3 bileşimi artırılarak minimuma indirilebilir. $20\text{ }\mu m$ 'ye kadar en uygun borür tabakası, $700-850\text{ }^{\circ}C$ sıcaklıklarda $270-800\text{ Pa}$ (2-6 torr) basınç etkisinde 6 saatlik işlemle elde edilebilir.

Plazma ile borlamanın avantajları

- Borür tabakasının derinliği ve bileşiminin kolay kontrolü,
- Katı borlama ile karşılaştırıldığında bor potansiyelinin yüksek oluşu,
- Enerji ve gaz tüketiminden tasarruf,
- Temiz yüzeylerin oluşması,
- İşlem sıcaklık ve süresinin kısalığı,
- Yüksek sıcaklık fırın ve donanımına gerek duyulmamasıdır.

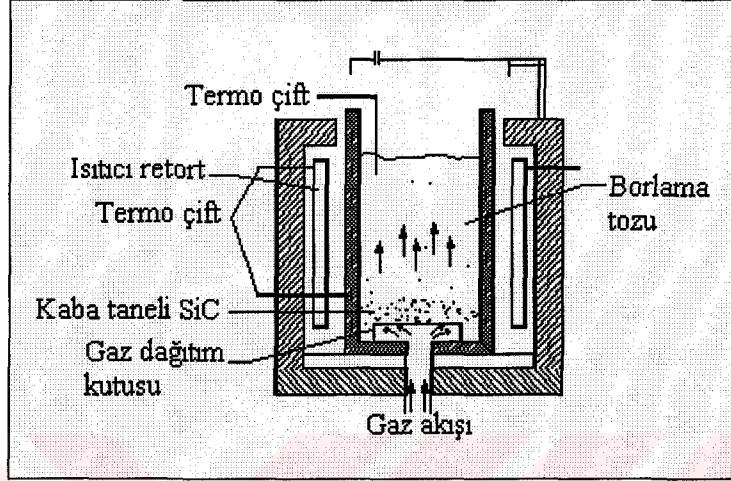
Yöntemin tek dezavantajı çalışma atmosferinin aşırı şekilde zehirli etkide olmasıdır.

Akışkan Yataklı Borlama (Fluidized bed boriding)

Borlama yöntemlerindeki son gelişme, akışkan yataktaki borlamadır (Şekil 3.5). Yöntem Ekabor WB gibi özel borlama tozları, N_2-H_2 karışımı gibi oksijensiz gaz karışımı ve kaba taneli SiC partiküllerinden oluşan yatak malzemesini içerir. Elektrik bir ısı kaynağı olarak kullanıldığı zaman, yatak daha hızlı ısı transfer eden ortam olarak görev yapar. Bu sistem genellikle sertleştirme ve temperleme fırınları ile donatılır (Sinha, 1991).

Yöntemin avantajları şunlardır:

- Düşük toplam maliyet ve üniform sıcaklık dağılımı,
- Yükselen gaz basıncından dolayı kullanılan fırın sızdırmazdır,
- Malzemelerin son hali üniformdur, yakın tolerans elde edilir ve seri üretim için uygundur,
- Yöntem otomatik hale getirilerek, seri üretime daha da uygun hale getirilebilir,
- Bu işlemden sonra parçalar sertleştirilebilir,
- Seri üretim için düşük işlem maliyetine sahiptir.



Şekil 3.5: Akışkan yataklı borlamanın şematik gösterimi (Sinha, 1991).

Flor içerikli atık gazların, çevresel problemlerden kaçınmak için iyice temizlenmesi gerekir. Artık gaz miktarının azaltılması bakımından darbeli (pulsu) akışkan yataklı borlama yöntemi kullanılır.

Borlu Tabakanın Tribolojik Özellikleri

Borlanmış çelikler yüksek sertliklerinden dolayı abrasif aşınmaya karşı çok iyi direnç gösterirler. Bu özellik, nitrürlenmiş ya da karbürleşen çeliklerle kıyaslandığında onlardan mükemmel derecede fazladır. Abrasif aşınmanın meydana geldiği ve borlama ile önemli ölçüde düşürüldüğü sistemlere; pnömatik transport sistemleri, plastik şekil verme makinaları, haddeme elemanları, pompalar, vanalar vb. buna örnek olarak verilebilir.

Borlanmış tabakaların adhezif aşınma mukavemeti, diğer yöntemlerden oldukça üstündür. Burada, kaplanmış malzemelerin yüksek sıcaklıklardaki mukavemeti özellikle ön plana çıkmakta; borlu tabakaların iyi aşınma özelliği göstermesi nedeni ile, yöntem çok az ya da hiç yağlayıcı kullanmadan çalışmaya olanak sağlayacağından gelecekte çevreyi korumakta önemli bir etken olacaktır (Matuschka, 1980).

Borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğu için, bu metal yüzeyde koruyucu ince bir oksit filmi oluşturmakta ve bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı vazifesi göstererek sürtünmeli aşınma sırasında,

Borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğu için, bu metal yüzeyde koruyucu ince bir oksit filmi oluşturmakta ve bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı vazifesi göstererek sürtünmeli aşınma sırasında, sürtünme katsayısını düşürmekte ve yüzeylerin birbirine kaynamasını önlemektedir. Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı, borlu tabakalar üzerinde herhangi bir olumsuz etki oluşturmamaktadır (Karamış ve diğ., 1995).

Demir-bor tabakalarının adhezif aşınma mukavemetleri Cr ve Mo ilavesiyle iyileştirilebilir. Abrasif aşınma Cr, Mo, V veya bunların hepsi üzerinde vanadyum karbürlerin çözündürülmesiyle düşürülür. Yüzey yorulmasına karşı düşük mukavemet Mo ve V' la yükseltilir. Triboksidasyon aşınması, alaşım elementleriyle çok az etkilenir. Demir dışı metallerin borlanması özellikle Ti, Ta ve Ni metallerinin, abrasif aşınma özellikleri üzerinde çok büyük iyileşme gösterdiği gözlenmiştir. Ti ve Ta' ın aşınma mukavemetine olumlu yönde etki ettiği saptanmıştır (Bhushan ve Gupta, 1991).

3.2.5. İyon İmplantasyonu

İyon implantasyonu, kristal içine iyonun hareketli difüzyon olayındaki gibi konsantrasyon gradyentinin bir sonucu olmayıp, iyonların kendi kinetik enerjisi ile meydana gelmektedir. İyon implantasyonu ile herhangi bir element herhangi bir katın yüzeye yakın bölgesi içine enjekte edilebilir. Bu da yüksek hıza sahip iyonların vakumdaki hedefe çarpmasıyla gerçekleşir. Gelen iyonlar, hedef malzeme atomlarıyla çarpışma sonucu enerjilerini kaybederler ve 0,01-1 μm arasında bir derinlikte dururlar. Düşük iyon akımlarında (birim alandaki iyon sayısı) derinlik konsantrasyon profili Gauss dağılımı ile karakterize olur. Yüksek akımlarda ise otomların iyon demeti tarafından hareket ettirilmesi ve saçılması gibi etkenler, elde edilecek maksimum derinlik konsantrasyonlarını sıralayabilir veya değiştirebilir. Yavaşlama süreci esnasında, gelen iyonlardan hedef atomlara önemli miktarda enerji transfer edilir. Çarpışmalar sonucu hedef yüzeyinden atomların sıçrama olasılığı vardır. İmplantasyon sonucu sıçrayan otomların boş bıraktığı yerler yeniden doldurulur ve böylece bir denge konumuna ulaşılır. İmplantate atomların konsantrasyonu yüzeydeki bir maksimumdan itibaren artan derinlikle azalır (Liau ve diğ., 1980).

İyon implantasyonu, yüzey özelliklerini geliştiren diğer tekniklerle (örneğin vakum kaplama ve iyon kaplama ile) karşılaştırıldığında birçok üstünlüklerinin yanı sıra bazı sınırlamalarının varlığı ortaya çıkar. İyon implantasyonu ile kaplama teknikleri (özellikle iyon kaplama) arasındaki farkı belirtmek önemlidir. İki teknik arasında görsel benzerlikler olsa da, birçok farklılıklar vardır. İyon implantasyonu ile yüzey alaşımı oluşur, kaplamadaki gibi arayüzey yoktur. İmplantate olmuş bölgenin kalınlığı 100 keV implantasyon enerjisinin kullanılmasında 100 Å'den daha azdır. İyon kaplamada ise daha yüksek değerlerdeki kalınlıklar söz konusudur, kaplama bileşimi kaplama yapılan yüzeyin bileşiminden bağımsızdır. Ayrıca, kaplama yüzeyinde oluşan taneciklerin (partiküllerin) ancak küçük bir kısmı (< %10) iyonize olur (Tur, 1993).

İyon implantasyonunun en önemli sınırlaması, sadece görünen yüzeyin işlem görmesidir. Karmaşık şekilli parçaların iç yüzeyleri bu teknikle işlenemez. Sığ penetrasyon tekniği ilk bakışta mühendislik uygulamaları açısından kullanışsız gibi görülmekle beraber implante iyonlar, fiziksel ve kimyasal özellikleri ilk implantasyon derinliğinden daha derinleri de etkilemektedir. Buna neden olan mekanizmalar halen araştırılmaktadır (Tur, 1993). İyon implantasyonunun bir denge tekniği olmaması nedeniyle, oluşumu çözünübilirlik limitine ve difüzyon hızına bağlı olmayan yüzey alaşımlarının oluşmasını sağlaması en önemli üstünlüğüdür. İmplantate alaşımların katı çözünübilirlik limitleri denge değerlerini birkaç kat aşabilir (Tur, 1993). Tekniğin bir diğer üstünlüğü de, kritik parçaların, istenildiğinde, sadece sınırlı bir bölgesinin implante edilebilmesidir. Ayrıca yüzey özellikleri kitle özelliklerinden bağımsız olarak optimize edilebilir ve implantasyon hiçbir önemli boyutsal değişmeye yol açmayacak düşük sıcaklıklarda yapılabilir. İlave olarak, implantasyon sonucu oluşan yüzey alaşımında, keskin arayüzey olmaması nedeniyle, adhezyon problemi yoktur.



4. YÜZEY KAPLAMA

Yüzey kaplama, malzemelerin yüzeylerini buhar biriktirerek, sol-jel yöntemi kullanarak, elektrolitik olarak veya ergitme prosesleri kullanarak tribolojik olaylara karşı korumak ve malzeme özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılır. Bu yöntemlere gereksinim, diğer yüzey modifikasyonu işlemlerinin malzemelerin özelliklerini geliştirmede yetersiz kalmalarından dolayıdır. Bu yöntemler ile yüzey mühendisliği alanında yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bu yöntemler;

1. Buhar Fazı Yöntemleri,
2. Sol-Jel Yöntemi,
3. Kaplama ve Anotlama Yöntemleri (Elektrolitik Kaplama),
4. Ergitme Yöntemleri'dir.

4.1. Buhar Fazı Yöntemleri

Son yıllarda buhar fazından yapılan çökeltme yoluyla kaplama tekniklerinin geliştirilmesiyle kaplamada kullanılan malzeme çeşitliliği büyük oranda artmıştır. Buhar fazından üretilen katı malzemelerin özelliklerinin sıvı fazdan üretilen katı malzemelerin özelliklerinin, sıvı fazdan üretilen aynı malzeme özelliklerinden çok daha geniş sahada değiştirilebildiği ortaya çıkmıştır. Çünkü ergitme teknikleriyle katı malzemeler denge özelliklerine yakın özelliklerle üretilebilirken, buhar fazında yığılma şartlarında malzemeler denge dışı özellikleriyle de elde edilebilmektedir. Bu şekilde elde edilen kaplama kaplanacak ana malzemenin özelliği ile doğrudan ilgili olmadığı için geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu yüzden buhar fazından elde edilen kaplama teknolojileri hızla gelişerek endüstriyel uygulamalarda önemli bir yere sahip olmuşlardır (Bunshah, 1982).

Son 20-25 yıldır ince sert kaplamalar alanında çok büyük gelişmeler kat edilmiştir. 1960 ve 1970'li yıllarda kimyasal yolla buhar biriktirme (CVD) ile yapılan kaplamaların olgunlaşması ile daha sonra da buharlaşıcı ve karışık kaynaklı fiziksel kaplamaların geliştirilmesi ince sert kaplamaların önemini arttırmıştır (Sert, 1997). Bu teknolojik gelişmeyi kullanmaktaki amaç, kesme aletleri ve makine parçalarının ömrünü daha da uzatmak için ince sert kaplamalar kullanarak 1-10 μm 'lik kalınlıktaki TiC veya TiN kaplamalarla metal karbür malzemeler üzerinde olumlu ömür uzamalarına katkıda bulunmaktır. Fakat bu gelişmeler her zaman olumlu sonuç vermemiştir. Buna rağmen kimyasal yolla buhar biriktirme (CVD) ve fiziksel yolla buhar biriktirme (PVD) çalışmaları hızlandırılarak geliştirilmiş ve bugünkü seviyeye gelinmiştir. Çalışmalarına başlanan ilk andan şu ana kadar CVD'nin en önemli dezavantajı, yüksek sıcaklıktaki (1000 °C) kaplamalar yapılırken ana malzemede deformasyon gözlemlendiği için çelik takımların bir çoğu bu metodun dışında bırakılmıştır.

PVD işlemleri 350-500 °C arasında aynı özellik ve kalınlıktaki kaplamalarda başarılı olduğundan CVD'nin dezavantajı PVD'nin gelişmesine yardımcı olmuştur. CVD ve PVD kaplamaların genel amaçlı ve yapı çelikleri ile demir dışındaki metallerde uygulanmasındaki başarısı bu kaplamaların, kaplandığı malzemelerin maruz kalacağı yükün kapasitesi ile sınırlı kalmaktadır (Bunshah, 1982).

Değişik amaçlı makine elemanlarına uygulanan sert tabakaların malzemelerin kendinde varolan özellikleri ortaya çıkarması genel mühendislik amaçlı malzemelere kazandırılan pozitiflik, CVD ve PVD kaplamaların kullanım alanını genişletmişlerdir (Sert ve Meriç, 1991).

İnce sert kaplamaların bir çok avantajları vardır:

- Son derece sert yüzeyler elde edilebilmekte,
- Aşınma direçli kaplamalar ile mükemmel yapışma sağlanabilmekte,
- İyi kayma özelliği ve düşük sürtünme katsayısı elde edilebilmekte,
- 5-100 mikron kaplama kalınlığı elde edilebilmektedir (Quinto ve diğ., 1987).

Kaplama yapıldıktan sonra çekicilik özelliği kazandırmak için kaplama üzerine altın, titanyum, nitrür veya bakır kaplamalar yapılabilir (Sert, 1997).

Buhar biriktirme yöntemlerini daha iyi anlamak için kaplama üç basamakta incelenmelidir.

1. Basamak: Buhar fazının oluşturulması; lazer yoluyla, elektrolitik yöntemle, plazma püskürtmeyle D-Gun yöntemiyle sağlanabilir.
2. Basamak: Buharın, buhar kaynağından iş parçasına taşınması.
3. Basamak: İş parçası üzerinde ince bir tabakanın oluşması. Çekirdeklenme ve büyüme işlemi kalınlaşan tabakanın iyonik parçacıklarla bombardımanından şiddetli bir şekilde etkilenir. Bu da mikroyapının ve bileşimin değişmesine, safsızlıklara ve kalıcı gerilimlere neden olur (Bunshah, 1990).

CVD ve PVD kaplamalar sadece vakum yöntemi kullanılarak buhar ile çökeltilebilir. Bu tekniklerin en büyük özelliği kaplama malzemelerinin uygulama sırasında üretilmesidir. Ana malzemelerin yüzeyinde sert kaplama elde etmek için CVD ve PVD olmak üzere iki değişik ana yöntem kullanılmaktadır (Habig, 1986).

4.1.1. PVD Yöntemleri

PVD işlemi ısıtarak, lazerle buharlaştırma, saçılma ve benzeri yöntemlerden biriyle malzeme buharı elde edilip, daha sonra buhar ana malzeme üzerine yoğunlaştırarak ince bir film tabakası elde edilmesiyle gerçekleştirilir (Habig, 1986).

PVD sistemi genelde püskürtme kaynaklı, iyon kaynaklı kaplama ve katodik kaynaklı kaplama olmak üzere üçe ayrılır.

Püskürtme Kaynaklı Kaplama: Katot püskürtme bir kaplama işlemidir. Bu işlem uygulanan 500-5000 V bir potansiyel altında yaklaşık 10^{-3} - 10^{-1} mmHg (torr) vakum altında ve bir koruyucu gaz atmosferinde yapılır. Metaller için uygulanan güç genellikle doğru akım iken iletken olmayan hedefler için radyo frekansı kullanılır. Bu işlemde argon iyonları metal kaynağı üzerine çarptırılır ya da anot üzerinde hedef metal atomlarının birikim oluşturmaları için hedef kaplama malzemesi yeterli enerjiye sahiptir (Şekil 4.1). Püskürtme ile atomların metal transferinde termal buharlaşma işlemleri ile yapılandırılan daha iyi kontrol edilebilir (Smith ve diğ., 1993).



Şekil 4.1: Püskürtme mekanizmasının şematik diyagramı

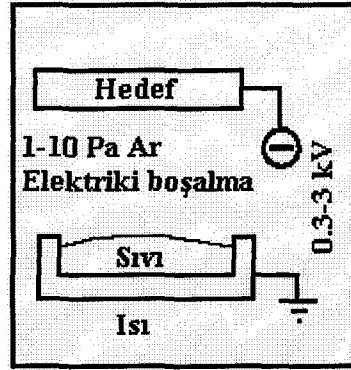
İyon (Plazma) Kaynaklı Kaplama: İyon kaplama sürecinde de kaplanacak malzeme, buhardan çöktürme yöntemine benzer şekilde buharlaştırılır. Yalnız buhar, kaplanacak malzemeye giderken bir plazma içinden geçer. Plazma gazı genellikle argondur ve vakum odasında 0.005-0.2 mmHg (torr) basınçtır. Plazma, substratı yüksek bir negatif gerilimle beslenerek üretilir. Buharlaştırılan atomlarda bir kısmı substrata giderken plazmanın etkisiyle iyonlaşır ve aktifleşir.

İyon kaplama sürecinde, kaplanan atomların arttırılmış, kinetik enerjileri nedeniyle substrate yapışma yeteneği daha da gelişir. Yani yüksek enerjili süreç, iyon kaplanmış tabakalara çok iyi yapışma özelliği kazandırır.

İyon kaplamada ilk kademe, substratın yüksek enerjili argon iyonları ile bombardımanıdır. Bu işlemle substrat üzerindeki kir ve oksit tabakaları uzaklaştırılır. Endüstriyel uygulamalarda kullanılacak parçalar sık asıldıkları için birinden sıçrayan paçalar diğerine yapışarak karma tabakalar oluşturabilmektedirler. “Yalancı difüzyon tabakası” denilen bu katmanlar, kaplamanın yüzeye yapışmasında çok iyi bir zemin oluştururlar. İkinci kademede, yukarıda açıklanan bombardımana devam edilirken, aynı zamanda kaplama malzemesi de buharlaştırılmaya başlanır. Belirli çöktürme süresi sonunda işleme son verilerek sistemden vakum kaldırılır.

İyon kaplamada, dirençle ısıtma yerine elektron ısıyı tabakalarının kaldırılması iyonlaşma verimini artırır. Ayrıca doğru gerilim yerine R.F. (radyo frekansı 1 MHz’den büyük) geriliminin kullanılması, diğer iyi etkileri yanında iyonlaşmayı da önemli ölçüde artırır. Şiddetli gaz iyonu bombardımanlarının doğurduğu substrat ısınması sorunu, destekli plazma iyon kaplama süreci ile azaltılabilir. Bu süreçte substrat daha az negatif bir potansiyelde beslenirken; plazma için gerekli

elektronlar, yaklaşık 100 V pozitif potansiyelli üçüncü bir elektrodu sisteme ekleyerek sağlanır. Bu yöntemde iyonlaşma verimi de yaklaşık on kat artırılmış olur. Şekil 4.2’de plazma kaynaklı PVD kaplama prensibi verilmiştir.



Şekil 4.2: Plazma kaynaklı PVD kaplama işlemi

Katodik Kaynaklı Kaplama : Elektron ışıını ile buharlaşmanın kullanıldığı yöntemlerde, kaplama yapısını ve bileşimini kontrol etmekte doğan güçlükler, alternatif bir buhar üretme yönteminin geliştirilmesine yol açmıştır. Püskürtme, katodik püskürtme veya atomizasyon denilen bu yeni süreçte, kaplanacak malzeme (target olarak da adlandırılır) negatif olarak bağlanarak doğru gerilim ile beslenir. Genellikle 0.02-0.15 mmHg (torr) basınçlı argon gazı bakım odasına alınarak oluşturulan plazmanın pozitif iyonlarını target yüzeyine bombardıman eder. Bu bombardımanla yerinden püskürtülen target atomları buhar fazına geçerek kaplanacak malzeme üzerinde yoğunlaşırlar.

Bu süreçte targetten püskürtülen atomların, iyonlarla çarpışarak substrata ulaşması, üniform bir kaplama tabakası elde edilmesini sağlar. Ayrıca buhardan çöktürmeye göre atomlara 10-100 kat arası daha yüksek enerji verildiği için daha iyi yapışma elde edilir. Buna karşın kaplama hızı düşüktür ve bazı durumlarda istenmeyen substrat ısınmalarına neden olur (Sert ve Karamış, 1993).

PVD İşleminin Dezavantajları

PVD işleminde varolan dezavantajlar şunları içermektedir:

1. Yüksek sıcaklıkta kaplanmış tabakalara kıyasla, düşük sıcaklıklardaki tabakalarda daha fazla sayıda hata ve daha az yoğunluk,
2. Saf metalleri kaplamadaki zorluklar,
3. Stokiyometriyi kontroldeki zorluklar (Sert, 1997).

PVD İşleminin Avantajları

1. Herhangi bir metal, alaşımlar, refrakter bileşikler ve bazı polimer malzemeler çöktürülebilir;
2. Difüzyon kaplamaların tersine plastik, kağıt, cam, seramik, metal ve alaşımlar gibi herhangi bir malzeme kaplanabilir;
3. Düz ve karmaşık şekilli parçaların yanında, istenen uzunlukta folyoların yüzeylerini tamamen veya kısmen kaplamak olasıdır;
4. Kaplanacak parça sıcaklığı, geniş bir bölgede değişebilir. Böylece yüksek sıcaklıklarda çalışmanın doğurduğu kötü etkiler en aza indirilebilir;
5. Kaplama tabakasının yüzeye yapışması çok iyidir;
6. İşlem sonucunda substratın yüzey kalitesine eş bir yüzey elde edilir;
7. Substrat sıcaklığı, ortam basıncı ve diğer işlem parametrelerini değiştirerek istenilen özellikte kaplamalar üretilebilir;
8. PVD süreçleri, insan sağlığı ve çevre kirliliği açısından herhangi bir sorun yaratmaz (Sert ve Karamış, 1993).

4.1.2. CVD Yöntemleri

CVD yöntemi (chemical-vapour-deposition), gaz şeklindeki kimyasal bağlantının, katı şeklinde reaksiyon ürünü olarak çöktürülmesi ya da bir başka madde üzerinde ayrıştırılması nedeniyle, oldukça fazla öneme sahip bir işlemdir (Topbaş, 1998).

CVD, prensip olarak geçen yüzyılın başında biliniyordu. Fakat 1940 ve 1950'lere kadar bu yöntemle ilgili herhangi bir üretime başlanamamıştır. İlk çalışma ABD'de Batelle Memorial Enstitüsü'nde değişik metallerin, karpitlerin, nitrürlerin, oksitlerin ve borürlerin üzeri kaplanarak kullanılabildikleri gösterilebilmiştir (Sert ve Karamış, 1993).

CVD yöntemi ile tek kristalli, çok kristalli veya amorf yapılar elde edilebilir. Kimyasal reaksiyonlar esnasında fiziksel ve kimyasal şartlar, oluşturulacak kaplama yapısına tesir ettiğinden, işlem kontrolü gerekmektedir. CVD ile kaplama, Campbell ve arkadaşlarının uzun süreli çalışmaları sonucu metal halojenürlerin kimyasal indirgenmesi sonucu elde edilmiştir (Dearnley, 1987). Bu kimyasal reaksiyonlar sonucu istenilen tabaka kalınlıklarının (5 – 15 µm) elde edilebilmesi için 1000 °C civarındaki sıcaklıklarda yaklaşık 5 – 6 saat çalışılmak gerektiği ortaya çıkmıştır. 1950'lerden sonra başlayan ilk çalışmalar CVD metodunun metalurjik, elektriksel ve optik uygulamalarda metal karbür, nitrür ve oksitlerin geniş bir saha için kullanılabildiğini göstermiştir (Moore, 1985).

TiC ve TiN kaplama tabakaları ilk defa 1960'larda ticari olarak karbür takımlarda kullanılmaya başlanmıştır. Metal şekillendirme ve kesme takımlarında aşınma dayanımlarının ve kullanım sürelerinin arttırılmasına yönelik çalışmalar bu kaplama teknolojisinin gelişmesinde büyük

etken olmuştur. Ancak CVD metodu yüksek işlem sıcaklıkları gerektirdiğinden (1000 °C), çelik takımların kaplama sonrası sertleşme işleminde çarpımalara neden olduğu görülmüştür. Aynı zamanda sementasyonlu karbür kesme takımlarında görülen kobalt difüzyonunun takımı zayıflattığı tespit edilmiştir (Moore, 1985).

TiN tabakalarının elde edilmesinde hızlı yığma oranları kullanılması halinde yapışkanlığı zayıf, üniform olmayan pürüzlü kaplama yüzeyleri elde edilmektedir. Bu olumsuzlukları gidermek ve mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla, gaz fazında farklı tabaka bileşenlerinin elde edilmesinin kolay olması nedeni ile, araştırmacılar çok katlı kaplama sistemlerinin kullanılması yoluna gitmişlerdir. Bu şekilde elde edilen TiC/Ti(C,N)/TiN üçlü kaplama sistemlerinde daha güçlü bir yapışkanlık elde edilmiştir. Çok katlı kompozit kaplama tabakalarıyla örtülen karbür kesme takımlarında, ana malzeme işlem sırasındaki yüksek sıcaklıklardan ve şiddetli sürtünme kuvvetlerinden korunduğu için kaplanmış takımlar çok daha yüksek kesme hızlarında çalıştırılabilmekte ve takım ömründe iyileşme sağlanabilmektedir (Moore, 1985). CVD metodunda yığma oranları nisbeten düşük olmakla birlikte çok sayıda atomun kaplayıcı eleman olarak iyi fırlatma gücü sayesinde çok sayıda karmaşık şekilde parçalar kaplanabilmektedir (Kılık ve Danışman, 1997).

CVD yönteminde yüksek işlem sıcaklıkları nedeniyle ortaya çıkan sorunları gidermek amacıyla son zamanlardaki çalışmalar işlem sıcaklığını azaltma doğrultusunda gelişmiştir. Bu nedenle halojenürler yerine metal hidrürlerin kullanılması yoluna gidilmiştir. Bu değişiklikler 400-600 °C sıcaklık aralığında termal ayrışmaya uğradıkları için özellikle yarı iletken endüstrisinde kullanılmaya başlanmış, fakat toksik ve patlayıcı özelliğe sahip olduklarından endüstride geniş kullanım alanına sahip olamamıştır.

4.2. Sol – Jel Yöntemi

Sol-jel teknolojisi yüksek kaliteli camları ve seramikleri üretmek için önemli bir tekniktir. Sol-jel ile farklı alt tabaka malzemelerinde ve karmaşık geometrili malzemelerin kaplanması kolaylığı, düşük işlem maliyet ve sıcaklığı gibi avantajlara sahiptir. Sol-jel teknolojisi basit olarak iki çeşittir. Birincisi, bir sıvı faz içerisinde koloidal tanelerin dağılımıyla oluşan sol ve bir jel üretmek için yeniden kararlaştırıcıdan oluşur. İkincisi, sürekli bir ağ (network) ile bir jel üretmek için kararlı organik bileşenlerin uzaklaştırılmasıyla oluşturulan alkoksitler gibi organometalik bileşenlerin polimerizasyonunu içerir. Filmler, bir alt tabaka üzerine sol-jel çözeltisinde derin (deep) veya ağ (spin) çöktürme, spreyle oluşturulabilir. Organik bileşenlerden uzak bir jel tabakası için ince kat (film) 70 °C'de kurutulur ve oluşan kristal tabaka, amorf tabaka ve kalıntı organik bileşenler pirolize etmek için 400-700 °C sıcaklık aralığında ısıtılır.

Bu avantajlarına rağmen sol-jel yöntemi, endüstride yaygın olarak kullanılamamaktadır. Bunun nedeni, ısıtma yöntemi sırasında organiklerin engellenmesi sonucu oluşan kaplamaların

kırılmalara neden olduğu ve çatlağı önlemek için kaplama tabaka kalınlığının 0.5 mm' den daha az olmasıdır.

Sol-jel yöntemi, kaplama ile alt tabaka arasında ısıl uyumsuzluktan ileri gelen etkileşmeden dolayı, esas itibariyle alt tabakaya bağlıdır. Bu iki faktörün kombinasyonu genellikle kaplama kalınlığının 10 mm' den daha büyük olmasını engeller. Sol-jel kompozit kaplama yöntemi (DATEC yöntemi) Barrow ve Petroff tarafından geliştirilen, geleneksel bir kaplama yöntemidir. İnce seramik tozları alt tabaka yüzeyine; spre, derin veya ağ çöktürme ile, bir sol-jel boyadan oluşan sol-jel çözeltisi içinde dağıtılır. Bu yöntem ile geleneksel sol-jel yöntemiyle elde edilen alt tabaka yüzeyinde kaplama kalınlığı daha büyüktür ve kaplama mikroyapısında kontrollü birbirine sıkı bağlı filmler elde edilir. Yüksek sıcaklıklarda (1000 °C) elde edilen seramik tozunun yararlı özellikleri 400 °C gibi düşük sıcaklıklarda da oluşabilir. 25 mm' den daha kalın çatlaksız birbirine sıkı bağlı bir film tabakası çöktürülebilir, bu kalınlık 500 mm olabilir. 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.

Sol-jel kompozit kaplama yöntemleri; otomotiv ve kalıp elemanları üzerinde üretilen kaplamaları içine alacak şekilde, termal barrier kaplamalar, yüksek frekanslı tıbbi ve yüksek sıcaklıklı güç çeviriciler için piezoelektrik kaplamalar, düşük sıcaklıklı elektrik yalıtımı için dielektrik kaplamalar gibi uygulama alanı geniş olan bir yöntemdir (Olding ve diğ., 2001).

Sol-jel yöntemi 1970'li yıllarda yoğun bir şekilde ele alınmış ve 1980'li yıllarda ise tamamiyle yüze yakın araştırma yapılarak literatüre kazandırılmıştır. Buna göre bu yöntem, tamamiyle monolitik formda titanyum oksit (TiO_2), zirkonya (ZrO_2), alümina (Al_2O_3), silika (SiO_2) gibi ticari seramik oksitlerinin düşük sıcaklıkta üretildiği yöntemlerdir. Bu konu hakkında ilk olarak geniş bir araştırma 1975 yılında Yoldas tarafından geniş skalalı kserojeller üretmiştir. 1981 yılında Rice ve Becher $ZrO_2:Al_2O_3$ seramik kompozitleri sol-jel ile üretmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, ZrO_2 takviyeli Al_2O_3 sistemi için hem kırılma mukavemeti hem de kırılma tokluğundaki artışı belirlemişlerdir. 1984' de Hoffman ve arkadaşları AgCl ve CdS fazlarını kristal formda olan AgCl: SiO_2 ve CdS: SiO_2 gibi ince scale kompozitlerden değişik di-fazlı jellerin farklı tiplerini üretilerek sol-jel' e farklı bir yaklaşımla onların dağıtılabildiğini ve kompozitte aşırı bir homojenlik sağladığını göstermişlerdir. Sonuç olarak, sol-jel teknikleri tek tabakalı kompozitleri üretmek için başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Rodeghiero ve diğ., 1998; Liu ve diğ., 2002; Olofinjana ve diğ., 2000).

4.2.1. Dip Kaplama Yöntemi

Dip kaplama yöntemi kaplanacak malzemenin uygun bir sol çözeltisine daldırılıp ve sonra malzemenin kontrol altına alınmış sıcaklık ve atmosfer koşullarında uygun hızda çözeltiden çekilmesi işlemi olarak tanımlanır. Kaplama kalınlığı esas olarak malzemenin çekilme hızına, çözelti içeriğine

$$h = c_1 \sqrt{\frac{U\eta}{g\rho}}$$

Burada:

h = kaplama kalınlığı,

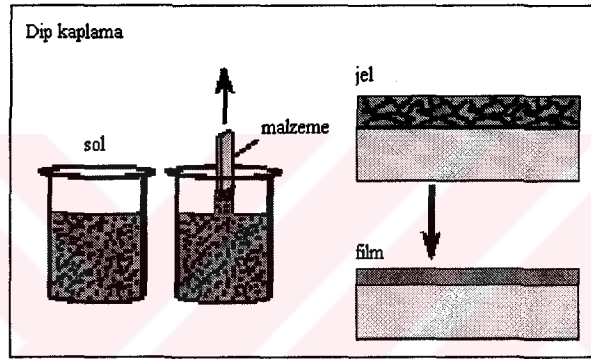
c_1 = oran sabiti (genellikle 0.8 dir.),

U = parçayı çekme hızı,

η = vizkozite,

ρ = yoğunluk,

g = yerçekimi ivmesidir (Mellor, 2001). Şekil 4.3’de sol-jel ile dip kaplama işleminin prensibi verilmiştir.



Şekil 4.3: Sol-Jel ile dip kaplama (Schmidt ve Mennig, 2000)

4.3. Kaplama ve Anotlama Yöntemleri (Elektrolitik Kaplama)

Metallerin elektrokimyasal birikim ve çözünmesi bir çok sayıda metal işleme yöntemlerinde kullanılır. Bunlardan en yaygın kullanım alanı bulan ve en iyi bilineni elektrolitik kaplamadır. Metal kaplama, yüzeylere elektrolitik birikim yolu ile uygulanır. İletken bir yüzey tabakası sağlamak koşuluyla, kaplanan yüzey metal ya da metal olmayan maddedir.

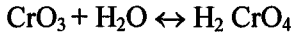
Bir kaplama sistemi başlıca bir katot, bir anot, bir elektrolit ve uygun bir kaplama kabından oluşur. Bunun yanında bazı ek araçlara da gereksinim duyulur. Bunlar elektrolitin karıştırılması ve saflaştırılması ve herhangi bir otomatik kontrol için gerekli olan araçlardır. Elektriksel araçlar ise ana güç kaynağından gerekli düşük gerilim sağlamak amacıyla bir azaltıcı dönüştürücü ve rektifiye edici araçlardır. Bazı hallerde motor jeneratörler de kullanılmaktadır. Bu arada kaplama hücrelerine gerekli gücün istenen ölçülerde verilmesini sağlayacak kontrol sistemlerine gereksinim vardır. Kaplama

sonucunda oluşan metal kristal haldedir, kristalin boyutu ve kristallerin birikim şekli, birikimin adhezyon, süreklilik, görünüş, sağlamlık ve diğer özelliklerini belirler (Saraç, 1995).

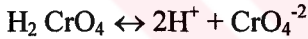
Krom Kaplama

1905 yılında Carveth ve Curry tarafından üzerinde araştırma yapılan krom kaplama giderek büyük önem kazanmış özellikle dekoratif uygulamaların en önemlilerinden biri olan otomotiv endüstrisinde bir çok çeşitli yüzeylere (çelik, çinko, bakır, alüminyum ve plastik gibi) parlaklık, sürekli dayanım ve görünüm sağlamak için uygulanabilir (Yıldırım, 1989; Saraç, 1995; Tyler, 1995). 400 °C sıcaklığın üzerinde bile hava ile donuklaşma göstermeyen krom, oda sıcaklığında oksidasyon ve korozyona karşı dayanıklı olup, ortamda halojen bulunmadığı sürece nitrik asit tarafından etkilenmez (Saraç, 1995).

Uygun koşullar altında gerçekleştirilen elektrolitik krom kaplama parlaktır ve yeniden parlatmaya gerek yoktur. Krom iyonları genellikle kromik asit ya da krom oksit kullanılarak sağlanır. CrO_3 sulu çözeltisinde kromik asidi oluşturur (Saraç, 1995).



Bu asit ise hidrojen ve kromat iyonlarına ayrışır.



Bu kaplamayı seçmenin en temel amacı; toleranslı bir makine parçasının basınç, darbe ve aşınma gibi mekanizmalara karşı dirençlilik sağlamak için sert yüzeyler elde etmektir (Simao ve Aspinwall, 1999). Kromaj ile düşük sürtünme katsayısı gösteren merdane, makine valfleri, piston yüzükleri, çizim takımları, miller ve mil yatak yüzeyleri üretilir (Tyler, 1995). Ayrıca yüksek ısıl direçlerinden dolayı buhar türbinlerinde ve dökümhane kalıplarında; kimyasal uygulamalar için korozyondan korunmalarda; ilaç ve gıda gibi bir çok alanda kullanılmaktadır (Chiu ve diğ., 2002).

Sert Krom Kaplama

Yaygın olarak endüstriyel veya mühendislik krom kaplama tekniği olarak bilinen sert krom kaplama aşağıdakiler açısından dekoratif krom kaplamadan ayrılır.

1. Sert krom kaplama aşınma, abrasyon, ısı veya korozyon direncini arttırmak amacıyla parçalara uygulanabilir.
2. Sert krom kaplamalarda 0.1-20 mm aralığındaki kalınlıklarda normal olarak sert krom çöktürülür. Bunun yanında dekoratif kaplamalarda ise 0.1 mm'lik kalınlık nadiren aşılr.
3. Sert krom kaplamaya ikinci bir işlem gerekmebilir. Fakat dekoratif kaplamalarda ikinci bir işlem gerekir.

3. Sert krom kaplamaya ikinci bir işlem gerekmebilir. Fakat dekoratif kaplamalarda ikinci bir işlem gerekir.
4. Dekoratif krom kaplamalar gözeneklidir. Bunun aksine sert krom kaplamalar daha yoğundur. Fakat mikro çatlaklar içerir.

Sert krom kaplama temel olarak aşınma direnci uygulamalarında takımların performanslarının geliştirilmesinde ve ömürlerinin artırılmasında kullanılır.

Sert krom kaplama (HCr), krom nitrür (CrN) ve krom karbür (CrC) gibi krom esaslı kaplamalar önemli malzemelerin kullanılma ömrünü ve aşınma direncini arttırmak amacıyla çeşitli malzemelere uygulanır. Bunlar arasından sert krom kaplama parçaların korozyon ve aşınma direncini arttırmak için kullanılan çok yaygın bir tekniktir ve abrasiv aşınmanın önemli olduğu bir çok yerde kullanılabilir. Sert kromlama basit ekipmanlarla kayda değer bir kalınlık için elektrokimyasal olarak çöktürülebilir (Chiu ve diğ., 2002).

4.4. Ergitme Yöntemleri

Nitrokarbürleme, plazma nitrüleme, elektriki boşalım, sertleştirme, CVD ve PVD yöntemleri gibi bir çok yüzey kaplama teknikleri vardır. Dolgu metal veya tozlar ile kaplama; kaynak, ısıl püskürtme veya benzer kaynak yöntemleri ile çoğu zaman yapılır. Son çalışmalarda araştırmacılar yüzey modifikasyonu için lazerle iletme üzerine odaklanmışlardır. Tungsten inert gaz ısı kaynağı ise yüzey modifikasyonunda belli bir potansiyele sahiptir (Eroğlu ve Özdemir, 2002).

Isıl püskürtme yöntemi otomotiv endüstrisi için ilgi çekici bir yöntemdir. Isıl püskürtme kaplamaları oldukça kısa sürelerde elde edilebilirler. Isı girişi ve çarpılmalar bir çok CVD yönteminde daha azdır (Edrisy ve diğ., 2001).

PTA ile alaşımlama lazer veya elektron ışın proseslerinden daha az enerji yoğunluğuna rağmen daha basit ve ucuzdur. Bununla birlikte PTA alaşımlama tekniği kompozit malzemelerin üzerine bor modife etmede başarılı bir şekilde uygulanır (Bourithis ve diğ., 2003).

4.4.1. Isıl Püskürtme (Thermal Spray)

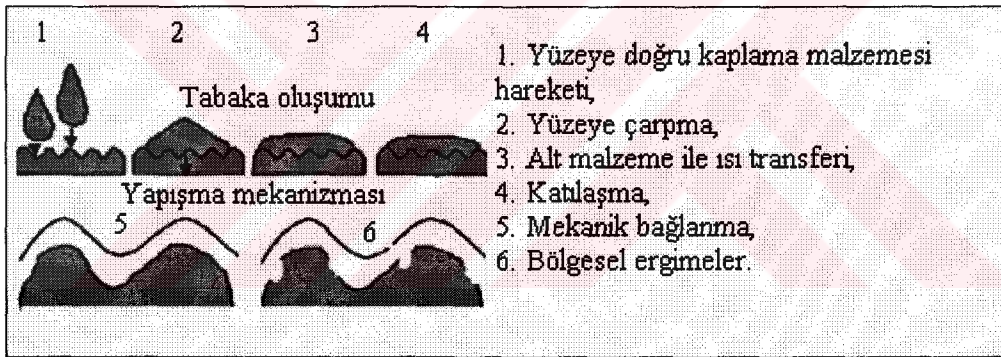
Isıl püskürtme yöntemlerine ait ilk uygulama 1900'li yılların başlarında İsveç'li mühendis M.U Sckoop tarafından yapılmıştır. İlk uygulamada kurşun ve kalay teller, oksijen-asetilen alevinin enerjisiyle bir kaynak torcu içinde eritilir. Daha sonra torçlar, toz halindeki malzemelerin kullanımı için tasarlanmıştır. 1908 yılında yine M.U Sckoop tarafından elektrik arklı tel püskürtmenin patenti alınarak dolgu işleminde daha fazla başarı elde edilmiş ve bu amaçla çeşitli metaller kullanılmıştır. Plazmalı ısıl püskürtmeyi geliştirmek, yüksek sıcaklık ihtiyacını karşılamak ve aşınma dirençli malzeme elde etmek ve kaplama kombinasyonunu sağlamak amacıyla ısıl püskürtme teknolojileri

Günümüzde ısıl püskürtme, püskürtme tabancasının içinde veya dışında ergitilen metal tozlarının yüzeyde kaplanması ile ilgili tüm yöntemleri içerir.

Isıl püskürtmenin avantajlarından birisi, eriyik haldeki damlacıkların-ergime olmayan esas malzeme üzerine yayılmasıdır. Isınma sadece esas malzeme yüzeyinde olur (Bunshah, 2001).

Isıl püskürtme yöntemi, aşınma direncini arttırmak ve bakım amaçlı kullanılır. Bu yöntem; otomotiv, biyomedikal, turbomakineler ve genel tamir-bakım endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. Isıl püskürtme yöntemi kullanarak makine parçalarının aşınma özelliklerini iyileştirip, aşınmaya dirençli kaplamalar üretmek suretiyle dünya çapında milyonlarca dolar tasarruf sağlanabilmektedir (Charles ve Howes, 1994).

Isıl püskürtme, kaplama tabakası elde etmek amacıyla önceden hazırlanmış olan esas metale çok ince metalik veya metalik olmayan malzemeleri çökelten bir grup yöntemi tanımlamak için kullanılan (jenerik) bir terimdir. Kaplama malzemesi; toz, çubuk veya tel biçiminde olabilir. Isıl püskürtme tabancası, kaplama malzemesini ergitmek için gerekli olan ısıyı bir plazma arkı, yanıcı gazlar ya da bir elektrik arkı ile elde eder. Ergiyen kaplama malzemesi yöntemde kullanılan gazlar sayesinde yüzeye geçişir. Yüzeye çarpan partiküller, ince bir tabaka oluşturur ve bir bağlanma sağlar. Kaplama soğuyarak lamelli bir yapı oluşur. Şekil 4.4'de ısıl püskürtme tabacasının oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Isıl püskürtme tabakası oluşumu (Bunshah, 2001).

Ergiyen kaplama malzemesinin esas metal ile birleşmesi ve birbiri ile tabaka oluşturması difüzyon veya kaynak kabiliyetine bağlıdır. Kaplamalar, genellikle mekanik bağlanma ve bölgesel olarak çeşitli sınıflarda kimyasal bağ kuvvetleri ile oluşmaktadır (Villat, 1986).

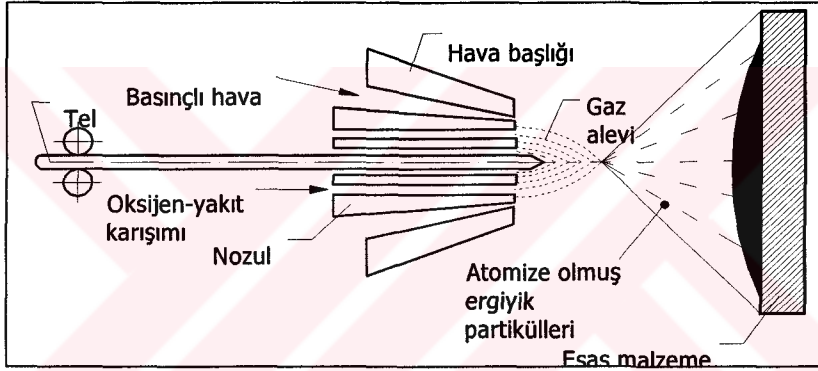
Isıl püskürtme yöntemleri;

1. Alevle püskürtme,
2. Elektrik arkı ile püskürtme,
3. Patlamalı püskürtme (D-Gun),
4. Plazma ile püskürtme,
5. Yüksek hızlı oksî-yakıt (HVOF) püskürtme olmak üzere beş grupta incelenebilir.

4.4.1.1. Alevle Püskürtme

Alev ile püskürtme yönteminde, kaplama malzemesini ergitmek için kullanılan yanıcı bir gazın (asetilen, propan ve oksijen-hidrojen) kontrollü tutuşması ile gerekli olan ısı üretilir. Gazın tutuşması ile oluşan ısı, kaplama malzemesini ertir ve bu şekilde oluşan sıvı haldeki kaplama malzemesi, esas malzeme yüzeyine basınçlı havayla fırlatılır. Sıvı kaplama malzemesi, yüzeye çarpar ve daha sonra ısını kaybederek soğur (Bach ve Duda, 2000).

Kaplama malzemesi tel veya toz biçiminde olabilir. Bu kaplama malzemesini püskürtmek için alev püskürtme tabancasında yapılan değişiklik lüle (nozül) veya hava boşluğu şeklindedir. Ayrıca bu yöntemde kullanılan gazlar; oksijen-asetilen, oksijen-propan ya da oksijen-hidrojen'dir (Clare ve Crawmer, 1992). Şekil 4.5'de ise, tel ile alev püskürtmenin şematik prensibi gösterilmektedir.



Şekil 4.5: Tel ile alev püskürtme

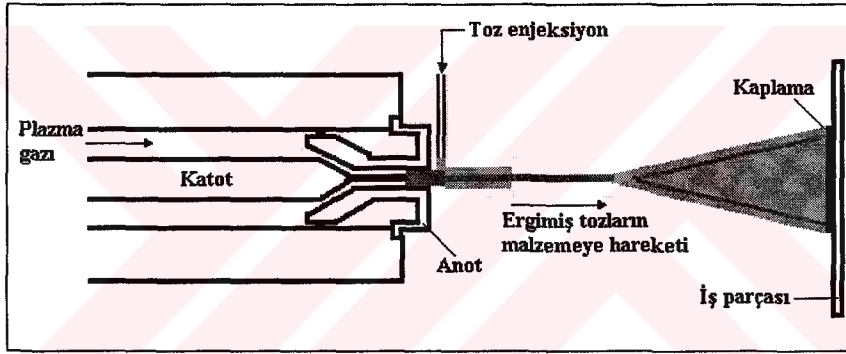
Kaplama malzemesinin toz biçiminde olması durumunda toz malzeme aleve enjekte edilir, burada ısıtılır ve sıcak gaz akışı ile iş parçası yüzeyine gönderilir. Tel ya da çubuk biçimindeki kaplama malzemesinin uygun konumunda alev içinde bir ergime ucu oluşturulur ve buraya basınçlı havanın püskürtülmesi ile alev, püskürtme akışına dönüştürülür. Daha sonra tanecikler iş parçasına doğru gönderilir (Bach ve Duda, 2000; Akay ve diğ, 1997). Tüm ısı püskürtme yöntemlerinin hava ortamında yapılması, kaplama işlemi sırasında havanın önemli miktarda yakalanışına ve kaplamada boşlukların oluşmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, püskürtme işlemi sırasında ergimiş olan damlaların oksitlenmesi de söz konusudur. % 20'ye kadar ulaşan boşluk seviyelerinde mekanik mukavemet azalmaktadır. Ancak; bazı özel durumlarda, örneğin yağlamalı kayma gibi bazı tribolojik uygulamalarda, kontrollü oluşturulmuş boşluklar yararlı bölgesel yağ depoları sağlamak bakımından faydalı olmaktadır (Hutchings, 1992).

Alevle püskürtmenin uygulama alanları şunlardır:

- Çelik endüstrisi,
- Maden endüstrisi,
- Çimento ve beton endüstrisi,
- Kimya endüstrisi,
- Cam üretim endüstrisi,
- Otomotiv endüstrisi (Bunshah, 2001).

4.4.1.2. Plazma - Jeti ile Püskürtme

Plazma püskürtme yöntemi, ısı püskürtme yöntemleri arasında en esnek kullanım şansına ve çeşitliliğine sahip olan bir yöntemdir. Plazma püskürtme yönteminin yüksek sıcaklığı, yüksek sıcaklık korozyonunu ve aşınmayı önlemede değer taşır; özel ısı uygulamalarda, elektrik ve biyomedikal amaçlar için kaplamanın çöktürülmesini sağlar. Şekil 4.6'da plazma jeti ile püskürtmenin şekli görülmektedir.



Şekil 4.6: Plazma-Jeti İle Püskürtme

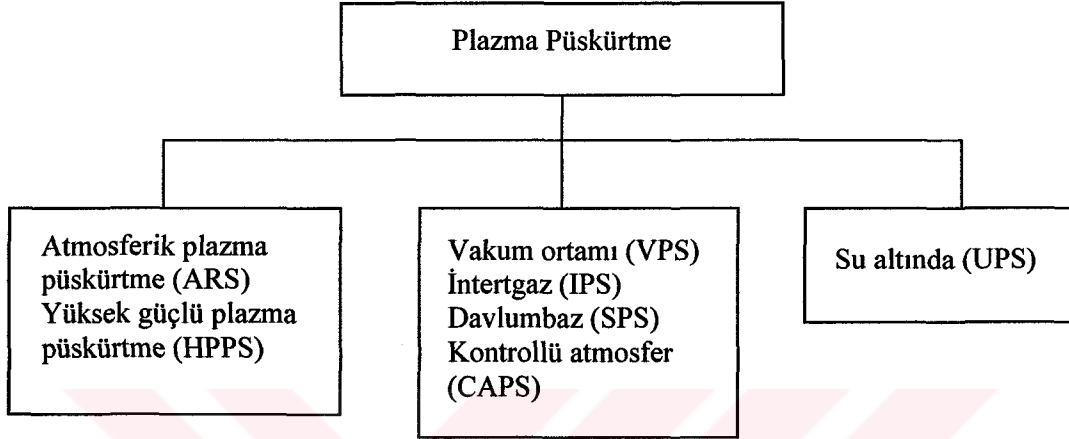
Bir yüksek frekanslı kıvılcım ile başlatılan bir elektrik arkı plazma püskürtme için bir enerji kaynağıdır. DC plazma tabancasındaki ark, silindirik volfram (W) katod ile radyal, eşmerkezli bakır anot (nozül) arasında yanar. Genel olarak kullanılan gazlar argon, helyum veya azot ya da bu gazların karışımı şeklinde nozulun içine gönderilir. Bu gazlar arkı geçtiğinde; katodik kaynaktan gelen elektronlar ile plazma halinin oluşumuna sebep olan gaz molekülleri arasında reaksiyonlar oluşur (Bunshah, 2001).

Gazlar arka ulaştığında ısınır, radyal ve eksenel olarak genişler ve nozulun çıkışına doğru hızlanır. Daha sonra plazma gazının atom ve molekülleri agzotermik reaksiyonla bileşir ve böylece çekirdek bünyesindeki sıcaklık, ısı ve radyasyonun yayınımindan dolayı 10000 K'den daha yüksek bir değer alabilir. Termoelektrik ve elektromanyetik etkiler, arkın çekirdek bünyesini sınırlandırarak enerji yoğunluğunu artırır (Bunshah, 2001).

Kaplama malzemesi (genellikle toz halinde) taşıyıcı bir gaz ile yüksek enerjili plazma jetine enjekte edilir. Plazma bekinin dizaynına bağlı olan enjeksiyon noktası, jet eksenine çeşitli açılarda toz deliğinden dışta veya içte olabilir.

Partikül hızları yöntem dizaynına, plazma gazına ve kaplama malzemesine bağlı olarak 300-700 m/s'ye ulaşabilir. Püskürtülmüş toz malzemenin özellikleri ile kombine edilen radyal ve eksenel hızların birleşimi toz partiküllerin çeşitli yörüngelerde hareketine neden olur.

Plazma püskürtme yöntemi, farklı atmosferlerde (ortamlarda) farklı basınç değerlerinde yapılabilmektedir. Şekil 4.7'da plazma püskürtme yönteminin işlem değişkenleri verilmiştir.



Şekil 4.7: Plazma püskürtme yönteminin işlem değişkenleri

Atmosferik Plazma Püskürtme Yöntemi (APS): Ekonomik olan en önemli plazma püskürtme yöntemi, atmosferik plazma püskürtme yöntemidir. Yöntemde toz tanecikleri, hava atmosferi ile temas halindedir. Hava atmosferi, kaplama malzemesinin seçimini sınırlandırır. Çünkü toz tanecikleri hava atmosferinde oksitlenebilir. APS'nin en temel uygulama alanı aşınma ve korozyona karşı korunmak için kaplama katı üretimidir. APS'de yaygın olarak oksit seramik kaplama malzemeleri kullanılır. Diğer kaplama malzemeleri, metaller ve özellikle oksitleyici ortamdan etkilenmeyen bazı alaşımlardır. APS kaplamaların gözenekliliği genellikle % 1-5 arasındadır. Esas malzeme ile plazma torcu arasındaki püskürtme mesafesi, malzemelere ve püskürtme parametrelerine bağlı olarak yaklaşık 100-150 mm'dir.

Yüksek Güce Sahip Plazma Püskürtme (HPPS): Atmosferik plazma püskürtmenin gelişimiyle HPPS ortaya çıkmıştır. Bu gelişme, yüksek ergime noktasına sahip seramik malzemeler için daha iyi kaplama yoğunluğu ve bağlanma dayanımı için gereklidir. Bu yöntemin avantajları; yüksek güç seviyeleri (200 kW), daha yüksek gaz akışı, çöktürme oranı ve yüksek verimliliğidir. HPPS'nin en tipik örneği baskı silindirlere üzerine krom oksit (Cr_2O_3) tabakasının kaplanmasıdır.

Vakum Plazma Püskürtme (VPS): VPS kaplamalar, düşürülmüş bir basınçta kapalı bir odada yapılır. Kaplama yönteminde önce, odanın basıncı 10^{-1} mbar'ın altında kadar düşürülür. Daha sonra kaplama odası pasif (inert) bir gaz ile doldurulur. Kaplama işlemi bu aşamadan sonra başlar. Odaanın basıncı yaklaşık 50-400 mbar'dır. VPS yöntemi ile daha temiz, daha yoğun, saf ve oksitsiz bir kaplama katı elde edilir (Bunshah, 2001; Villat, 1986).

İnert Gaz Plazma Püskürtme (IPS): VPS'den farklı olarak basıncı alınmış püskürtme odası, 1 bar basınçtaki bir pasif (inert) gaz (Ar, N) ile temizlenir. Bu yüzden hem esas malzeme hem de kaplama malzemesinde oksitlenme reaksiyonları gerçekleşmez.

Davlumbazlı Plazma Püskürtme (SPS): Bu plazma yöntemi, daha az maliyetler için kaplama odasının ve pompa sisteminin etkisini azaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Davlumbazlı kaynağa benzer olarak, iyonlaşmamış bir pasif (inert) gaz örtüsü plazma jetini, çevreleyen oksijen içerikli atmosferden korur ve esas malzemenin soğumasını düzenler.

Kontrol Edilmiş Malzemeli Plazma Püskürtme (CAPS): Bir sistemde vakum plazma püskürtme ve inert gaz plazma püskürtmenin kombinasyonu, kontrol edilmiş atmosferli plazma püskürtmeye (CAPS) neden olur. 50-400 mbar basınç aralığında VPS kaplamalar üretilir. 1 bar basınçta IPS kaplamalar, 4 bar gibi yüksek basınçta ise plazma püskürtmeli kaplamalar çöktürülür.

Bir CAPS sisteminin avantajı, tek adımda APS ve VPS kaplama sistemleri ile kaplama yapmak mümkündür.

4.4.1.3. Patlamalı Püskürtme (Detonation-Gun ya da D-Gun)

Bu yöntemde, yanıcı gazların ısı ve kinetik enerjilerinden faydalanılmaktadır. Boşluk seviyesi düşük, iyi bağlanmış tabakalar elde edilmek yöntemin temel hedefidir. Püskürtme tabancası uzun namlu biçimindeki bir tüpten oluşmakta ve toz halindeki kaplama malzemesi, azot gazı süspansiyonunda verilmektedir. Oksijen-asetilen karışımı, saniyede birkaç kez (4-8 defa) elektrik kıvılcımı ile tutuşturularak, toz taneciklerinin ısıtılmasını ve hızlandırılmasını sağlayan bir seri kontrollü patlama dalgaları meydana getirilir. Her defasında toz enjekte edildikten sonra patlamadan önce azot gazı boşaltılır (Akay ve diğ., 1997).

Bu yöntemde alev sıcaklığı yaklaşık 3000°C , esas malzemenin sıcaklığı ise CO_2 soğutma sistemi ile 150°C altında olup ergimiş damlaların hızı 800 m/s'dir. Bu şekildeki yüksek hızlı damlalar, esas metal üzerinde boşluk seviyesi düşük (% 0.5-1) ve iyi bağlanmış kaplamalar meydana getirir (Hutchings, 1992; Özenbaş, 1995). Yöntem çok gürültülü olup ses şiddeti 150 dB'den fazladır. Bundan dolayı işlem ses izolasyonlu bir odada yapılmaktadır (Akay ve diğ., 1997).

4.4.1.4. Elektrik Arkı İle Püskürtme

Elektrik arkı ile püskürtme, korozyon, erozyon ve aşınma direnci için 100-1500 µm kalınlık aralığında ince metalik kaplamalar için geleneksel bir kaplama yöntemidir. Yöntem, bir motor ile iletilen iki telin yüzeye çöktürülmesinden ibarettir. Teller kritik bir bölgeye ulaştıklarında bir elektrik arkı biçimlenir. Ark tellerin ucunu ertir ve uygun bir gaz atomizasyonu ile ertiyik haldeki metal tel uçları, damlalar şeklinde metal yüzeyine doğru hızlanır, yüzeyde soğur ve kaplama tabakası elde edilir. Bu yöntemle, Ni gibi süper alaşımlı yüksek sıcaklık yapısal malzemelerin bir bölümünde ön şekillenen koruyucu pasif (inert) gaz atomizasyonu ile yalıtkan bir bölmede elektrik ark spreyi üretilebilir. Elektrik ark püskürtme, 1- 10 g/s ertiyik akış debisine sahiptir (Matthew ve diğ., 2002).

Metalurjik değışimler ve çarpılma (distorsiyon) gibi malzeme yüzeyinde oluşabilecek düzensizliklerden kaçınmak amacıyla malzeme yüzey sıcaklığı çalışma esnasında düşük tutulabildiğı için bu elektrik ark püskürtme yöntemi, “soğuk yöntem” olarak da adlandırılmaktadır.

Elektrik arkı ile elde edilmiş kaplamalar, bu yöntemle eşdeğer olan yanma ile püskürtülmüş kaplamalardan daha yoğun ve serttir. Düşük çalışma maliyetleri, yüksek püskürtme oranları ve verimliliğı ona geniş alanlarda kullanma imkanı sunar.

Elektrik arkı ile püskürtmenin dezavantajları; yalnızca iletken tellerin püskürtülebilmesi ve yüzeye ön bir ısıtma uygulanmak isteniliyorsa ayrı bir ısı kaynağına ihtiyaç duyulmasıdır.

Elektrik arkı ile püskürtmenin esas uygulamaları korozyondan korunmak için yapılan alüminyum ve çinko kaplamalar ile büyük makine parçalarının kaplanması işlemleridir.

4.4.1.5. Yüksek Hızlı Oksi – Yakıt (HVOF) Püskürtme

Yüksek hızlı oksiyakıt yöntemi (HVOF), metal püskürtme teknolojisinde son yılların önemli gelişimidir. HVOF ekipmanındaki en yeni gelişme gaz yakıttan sıvı yakıtı olan değışikliklerdir.

HVOF yöntemi, maliyetinin uygunluğu ve yöntemin esnekliğı açısından bir çok endüstriye uyarlanabilmiş ısı püskürtme yöntemlerinden biridir. Tablo 4.1’de HVOF yönteminin kullanıldığı endüstri kolları verilmiştir.

Tablo 4.1: HVOF yönteminin uygulandığı çeşitli endüstri kolları ve uygulamaları (Tan ve diğ., 1999).

ENDÜSTRİ KOLU	UYGULAMA	MALZEME
Kağıt Endüstrisi	Çeşitli merdaneler	WC-Co-Cr, Cr ₂ O ₃
Çelik Endüstrisi	Fırın, konveyör makaraları	Cr ₃ O ₂ -NiCr
Basım Endüstrisi	Ölçme makaraları	Cr ₂ O ₃
Tekstil Endüstrisi	Taşıma rulosu	Al ₂ O ₃ -TiO ₂
Takımlarda	Kapama vanaları	WC-Co+WC-Ni, Cr ₃ C ₂ - NiCr
Elektronik Endüstrisi	İleken kablolar	Cu
Fabrika Konstrüksiyonu	Miller, kimyasal araçlar, ayırıcılar	Al ₂ O ₃ , Mo
Otomotiv Endüstrisi	Sürtünme diskleri	Mo

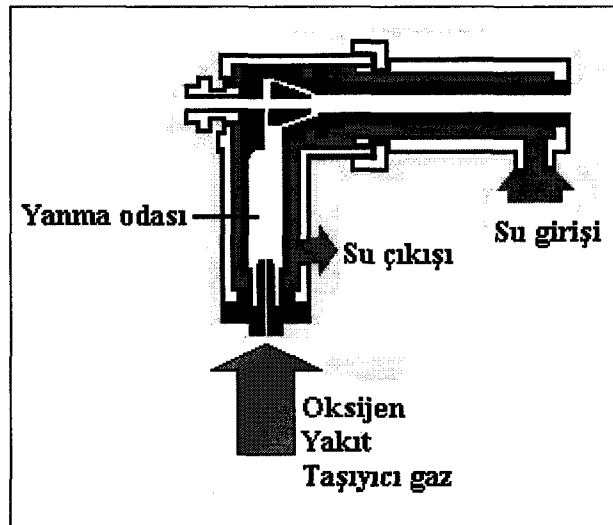
HVOF sisteminde yanan gazlar ve nozulda bulunan tozlar, gaz jetinin genleşmesi ile çok yüksek hızla dışarıya çıkarlar. D-Gun ile karşılaştırıldığında, HVOF'deki yanma sürekli. Odacıkta yanma yüksek basınç altında (> 8 bar) oluşur ve bu yüzden propan ve propilen gibi yanıcı gazlar basınç altında kararlı olmak zorundadır.

Çeşitli HVOF sistemleri, nozulun geometrisi, yanma odasının dizaynı ve tozun enjekte ediliş biçimi bakımından farklıdır. Toz kaplama malzemesi, nozul sistemi ve HVOF sisteminin türüne bağlı olarak sıcak haldeki gazların içine enjekte edilir. Partiküllerin ısınması sıcak haldeki gazların içine enjekte edilerek sağlanır. Partiküllerde ısınma ve hızlanma, tabancanın namlusunda meydana gelir. Alev sıcaklığı yaklaşık 3000°C 'dir. Genleşen gazların torç çıkışındaki hızı 1200 m/s 'dir. Toz partiküllerinin hızı ise tozların yoğunluk, biçim ve boyutuna bağlı olarak 600 m/s 'ye kadar ulaşabilir.

Yüksek partikül hızları ve oldukça makul sıcaklıklarda çalışıldığından, bu yöntemler yüksek sıcaklıklarda bozulmaya meyilli olan kaplama malzemeleri için tercihli olarak kullanılır. Bu yöntemle WC/Co ve $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ gibi sert metaller çöktürülebilir. Çünkü bu malzemelerin aşınma direnci ve dayanımı mükemmeldir. Hatta FeNiCo alaşımları, Hasteloy, Stellites ve Triboloy bu yöntemle verimli olarak çöktürülebilir (Bunshah, 2001).

HVOF yöntemi ile aşınmaya ve korozyona karşı koruma ile, ısı ve elektriksel yalıtımında kullanılan kaplamalar üretilmektedir. Püskürtme parametreleri özel uygulamalar için ayarlanabilmektedir. Yüksek çöktürme oranları (15 lt/h), geniş yüzeyli parçalarda işlem zamanını kısaltmaktadır (Charles, 1994; Bunshah, 2001).

JetKote, ilk ticari HVOF torcu olup, oksijen ve yanıcı gaz torcun yanma odasında yakılır ve sıcak gaz tabancanın namlusuna doğru yönlendirilir. Toz girişi eksensel olarak verilir ve ısıtılarak yanıcı gazlar yardımı ile namlu çıkışına hızlandırılır. Şekil 4.8'de Jetkote HVOF tabancası görülmektedir.



Şekil 4.8: JetKote HVOF tabancası

JetKote-HVOF'nin özellikleri:

- Düşük gerilimli kaplamalar,
- Yüksek sertlik,
- Düşük oksit seviyesi,
- Yüksek yayılma,
- Basit işlem,
- Mükemmel karbür tutma özelliği,
- Düşük işlem maliyeti,
- Yüksek bağlanma mukavemeti,
- Çok düşük gözeneklilik,
- Yüksek performans sergileyen kaliteli kaplamalar.

Elmas Jet(DJ) HVOF torcunda, 0,75 MPa gibi yüksek basınçta propan ve hidrojen gibi yanıcı gazlar patlatılarak veya yakılarak yüksek gaz hızı oluşturulmakta ve tanecikler çok yüksek bir hızda iş parçasına gönderilmektedir. Darbe sonucunda serbest kalan kinetik enerji diğer püskürtme yöntemlerine göre yüksek değilse eşit bir yapışma mukavemeti elde edilir. Bu yöntem, ana malzemeye çok iyi bağlanan ve yoğun kaplamalar elde edilmesi için, plazma püskürtme yönteminin yüksek ısı enerjisine karşın, püskürtülen taneciklerin kinetik enerjilerinden yararlanır.

Yöntemde, eksensel olmayan hava akışı ile alev sıcaklığının sulanması ve düşük alev jeti basıncı nedeni ile toza olan ısı transferi zorlaşmaktadır. Bu durum oldukça ince, boyut olarak birbirine yakın ve pahalı tozların kullanımını gerektirmektedir. Ayrıca bu torç ile yapılan kaplama yüksek oksit bileşeni göstermekte ve çökme verimi de düşük olmaktadır.

HVOF yönteminde, düşük sıcaklıklar (2800°C) ve yöntemin parametrelerinin hassas olarak kontrol edilmesi ile toz taneciklerinin aşırı yanması meydana gelmemektedir. Ergimiş taneciklerin sıcaklıkları, kaplanacak malzemeye olan darbeye bağlı olarak kinetik enerjinin ısı enerjisine dönüşümü sonucunda artmaktadır. Isıl enerjinin iş parçasına çok hızlı yayılması, kaplamanın hızlı katılaşmasına ve bunun sonucunda da gerilme içermeyen kaplama tabakalarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bunun yanında toz besleme oranı da kaplama tabakası özeliğine etki eden önemli bir parametredir.

HVOF yönteminde kaplama tabakası, tanecik sıcaklığı ve hızı ile etkilenmektedir. Tanecik hızı ve sıcaklığı, yanma odasındaki basıncın ve sıvı yakıt/oksijen karışım oranının değişmesi ile bağımsız olarak kontrol edilebilir. En büyük tanecik sıcaklığı, en büyük alev sıcaklığına karşılık gelmektedir. Tanecik hızı da yanma odasındaki basınca bağlıdır. Basınç arttığında tanecik hızı da artmaktadır. Yüksek basınç ve tanecik hızı, yüksek sertlikte kaplama tabakası oluşturmaktadır. Dolayısı ile çökme verimi tanecik hızı ve sıcaklığının fonksiyonu olmaktadır. HVOF yönteminde etkili olan parametreler, genel olarak ekipman ile ilgili birincil parametreler ve kaplanacak parçanın şekli ve yüzeyi ile ilgili olan ikincil parametreler şeklinde iki grupta toplanabilir.

Özel Isıl Püskürtme Yöntemleri

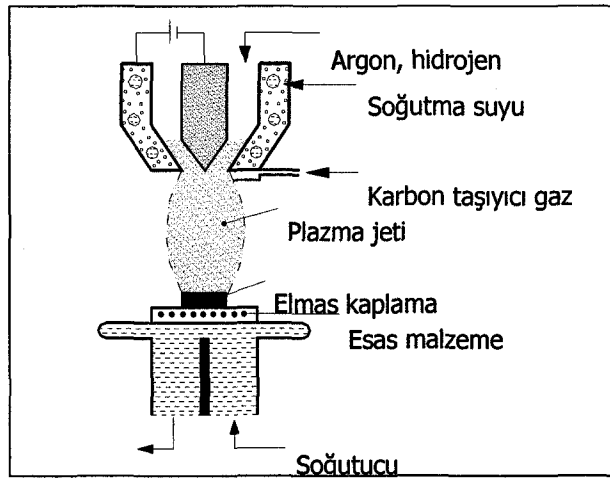
Reaktif plazma püskürtme, vakum plazma püskürtme yönteminin gelişmiş halidir. Bu yöntem püskürtme yöntemleri ve kimyasal buhar çöktürme yöntemleri arasında ayırt edilir.

Reaktif Plazma Püskürtme: Kaplama yöntemi esnasında, kaplama malzemesi VPS için kullanılan normal bir plazma torcuna enjekte edilir. Ancak, nozulun sonundaki bir reaktif faz plazma jetine enjekte edilir ve ergitilmiş haldeki patiküllerle kimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu yol TiC kaplamaların oluşumunda kullanılır. Kaplama tozu olarak titanyum (Ti) ve metan gazı (CH₄) plazma jetine enjekte edilir. Reaksiyon süresi (Dwell time) çok kısadır. Kaplama tabakasında TiC dağılmış haldedir. Bu sert fazların ince dağılımı, kaplanmış parçalar için aşınma direnci bakımından bir avantajdır.

Plazma Püskürtme Yöntemi ile Elmas Kaplama: Bu yöntem, çeşitli malzemeler üzerine elmas kaplamayı çöktürmek için kullanılır. Termal plazma, elmas kaplama için gerekli olan ısı koşulları oluşturmak için uygundur.

Elmas kaplamaların çöktürülmesinin sebebi, yüksek sertlik, çok iyi ısı transferi katsayısı ve yüksek elektrik direnci gibi mükemmel özelliklerdir. Elmas kaplamaların uygulama alanları, özellikle elektronik sanayiinde oldukça yaygındır.

Sözü edilen reaktif püskürtme kaplamalarından farklı olarak plazma jetine toz malzeme enjekte edilmez, sadece metan gibi bir hidrokarbon gazı enjekte edilir. Plazma alevinin yüksek entalpisi sayesinde hidrokarbon parçalanır ve elmas yapılar ve hatta grafit yapılar malzeme yüzeyine çöktürülür. Plazma alevindeki yüksek hidrojen içeriği ve yüksek entalpi etkisiyle, atomik hidrojen oluşur. Bu yolla, yüksek ergime sıcaklığına sahip olan malzeme üzerine saf elmas kaplamaları 80 µm/saat kaplama oranlarında çöktürmek mümkündür. Çünkü esas malzeme sıcaklığı yaklaşık 1000 °C'dir. Şekil 4.9'da elmas çöktürülmesinde kullanılan bir DC plazma jeti gösterilmektedir.



Şekil 4.9: Elmas kaplamaların çöktürülmesinde kullanılan bir ısı DC plazma jeti (Bunshah, 2001)

4.4.2. Kaynak

Endüstrinin her kesiminde kullanılan makina elemanları kullanıldığı yerdeki özelliğine ve beklentilere göre çeşitli usullerle imal edilirler. Bazen imalatı yeterli olmayan özellikler, sonradan o makina elemanına kazandırılmaya çalışılır. Kazandırılmak istenen sonraki özellikler, hiç kullanılmayan bir malzemeye de biraz kullanılıp aşınmış bir makina elemanına da uygulanabilir. İnce ya da kalın sert kaplamalar da makina elemanlarına sıkça uygulanır. Ama bazen hatalar öyle boyuta ulaşır ki, makina elemanlarında ortaya çıkan olumsuzlukların kaplamalarla telafisi mümkün olmayabilir. Geniş aralıklarda istenen yüzey artırımları; tel püskürterek, toz püskürterek, ince sert kaplama, krom kaplama, PVD, CVD kaplama ile sağlanamaz. Bu tür artırımları gerçekleştirmek için mutlaka ilâve bir metal (elektrot) kullanımını sağlamak gerekir. Bu yüzey artırımlarını sağlamada da elektrik ark, tozaltı, gazaltı (TIG, MIG, MAG), lazer ışını ve elektron ışını kaynak teknikleri kullanılabilir. Profesyonel ekipmanlar ve elemanlar kullanılarak gerçekleşen, metallerin kaynaklarla doldurulması da makina endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. İlâve metalin elektrik arkıyla ergitilerek önceden hazırlanan bölgeye aktararak yapılan transferi sırasında malzemede bir takım çarpılma, düzensiz gerilim ve sertlik, çatlama ve yüzey hataları gibi olumsuzluklar oluşabilmektedir. Ayrıca kaynaklar doldurulan yüzeylerde düzgünlük sağlanmadığı için talaşlı imalat yöntemlerinden herhangi birisi kullanılarak imalat tamamlanmış olur. Yine bu kaynak yöntemleri kullanılarak yüzeye esas malzemeden daha iyi aşınma, korozyon ve erozyon direncine sahip metal ve metalik tozlar geçirtilerek ergitme esaslı yüzey alaşımlama şeklinde yüzey modifikasyonu sağlanabilir. Bu alanlarda bir çok çalışmalar yapılmış olup bu yöntemlerin yüzey modifikasyonunda verimli olduğu gözlenmiştir.

4.4.2.1. Lazer Işın Kaynağı

Lazer kaynağı, yüksek yoğunluklu optik bir enerji üreten elektromanyetik ışınlama ve mikrokaynak tekniğidir. Lazer kaynağı, CO₂ (karbondioksit) ve Nd YAG (katı hal lazeri) şeklinde sanayide son yıllarda hızla gelişen bir uygulama alanına sahiptir. Nd – YAG katı hal lazerlerinin çoğunluğu mikrokaynak uygulamaları için kullanılır. Ticari uygulanabilirliği 25 kW'a kadar olan sürekli dalga CO₂ ve ticari uygulanabilirliği 2.4 kW'a kadar olan Nd- YAG lazerleri öncelikli olarak derin nüfuziyet kaynaklarında kullanılır.

Lazer kaynağı geleneksel kaynak yöntemleriyle kıyaslandığında belli başlı şu avantajlara sahiptir. Bunlar:

- Minimum ısı girdisi ile iş parçasının minimum düzeyde çarpılmasına yol açması,
- Isının tesiri altında kalan bölge (ITAB) çok dar olması,
- Odaklanmış lazer ışınının yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması,

- Kaynağın yüksek dayanım göstermesi,
- Zor kaynak edilebilen malzemelerin (örneğin, Ti, kuvarsit, vs.) birleştirilebilmesi,
- Elektrot ve dolgu metaline gerek duyulmaması,
- Sağlıklı kaynaklar (pozisyon, boyut ve nüfuziyet ile ilgili) elde edilebilmesi,
- Karışık şekilli parçaların yüksek hızda kaynak edilebilmesi veya kesilebilmesi,
- Çok dar aralıkların kolaylıkla kaynak edilebilmesidir.

Odaklanmış ışını kaynak enerjisi olarak kullanmada nüfuziyet için gerekli olan kaynak hızı, birleşme şekli ve malzemeye bağlıdır. Nüfuziyet aynı zamanda, lazer tipi (dalga boyu), koruyucu gaz seçimi ve akışı, malzemenin yansıtıcılığı ve iletkenliği, kaynaklı birleştirmenin geometrisi ve kaynak bölgesinin temizliğinin bir fonksiyonudur. Aşağıda sade karbonlu çelikler için nüfuziyet ve kaynak hızı arasındaki ilişki verilmiştir.

Lazer Kaynak Parametreleri

Lazer kaynağında rol oynayan başlıca parametreler şunlardır:

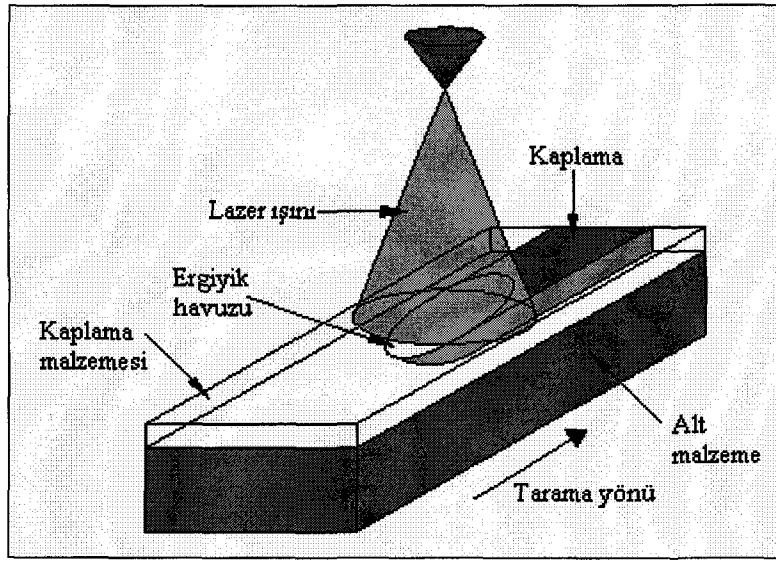
- Lazer ışınının gücü,
- Lazer ışınının çapı,
- Işının absorbe edebilme yeteneği,
- Kaynak hızı.

Lazer ışını gücü: Lazer kaynağında nüfuziyet derinliği, direkt olarak ışın gücü ve ışın çapının bir fonksiyonu olan lazer ışınının güç yoğunluğuyla ilgilidir. Sabit bir ışın çapında nüfuziyet, artan ışın gücüyle artar.

Lazer ışını çapı: Bu parametre güç yoğunluğunu belirlediğinden, çok önemlidir. Bununla beraber, yüksek güçlü lazer ışınlarında ölçümü çok zordur.

Absorbe edebilme yeteneği: Lazer kaynağının verimliliği lazer ışınının iş parçası tarafından emilmesine (absorbe edilmesine) bağlıdır. Lazer işlemi için herhangi bir ısı transferi hesabı, iş parçası tarafından absorbe edilen enerjiye bağlı kalır. Metallerin enerji absorpsiyonu, büyük ölçüde serbest elektronların hareketine bağlı olduğundan; absorbe edilebilme yeteneği, doğrudan metallerin iletkenliğiyle ilişkilidir.

Kaynak hızı: Lazer kaynağında kaynak hızı arttıkça, kaynak nüfuziyeti azalır. Şekil 4.10'da lazer ışın kaynağı ile yüzey alaşımlama işlemi görülmektedir.

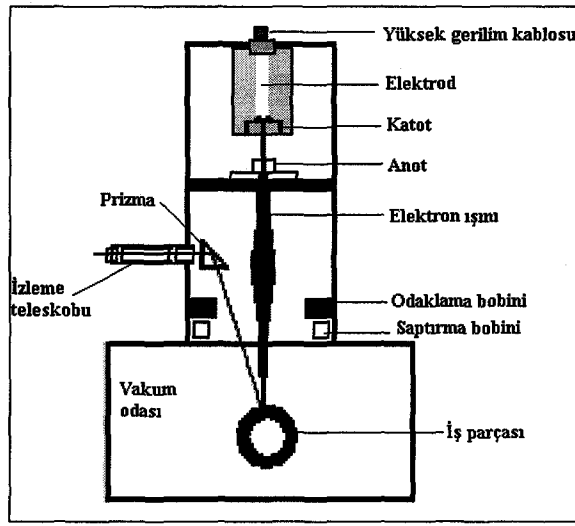


Şekil 4.10: Lazer ışın kaynağı ile yüzey alaşımlama (Dubourg ve diğ., 2002).

4.4.2.2. Elektron Işın Kaynağı (EBW)

Elektron ışın kaynağı (EBW), yoğunlaştırılmış ve yönlendirilmiş elektron demetinin sahip olduğu enerjinin metallerin ergitilerek kaynak edilmesini sağlayan bir işlemdir. Elektron demetinin sahip olduğu kinetik enerji, kaynak yapılacak parçaların küçük bir bölgesinde yoğunlaştığı için, kaynak bölgesinde enerji yoğunluğu 108 W/cm^2 değerine erişebilmektedir. Bu yöntemde kaynak işlemi yüksek vakum, düşük vakum ve vakumsuz ortamda yapılmaktadır.

Elektron ışın kaynağı ile kaynak yapılacak parçalar genellikle ilave metal kullanılmaksızın birleştirilirler ve birleştirilecek iki parçanın arasındaki boşluğun 10-2 mm'den daha fazla olmaması gerekmektedir. Elektron ışın kaynağında kaynak dikiş formu diğer yöntemlere göre farklıdır. Bu yöntemde, kaynak dikişinin (derinlik/genişlik) oranı yüksektir (25/1). Bu durum kalın parçaların tek pasoda kaynak yapılmasını sağladığı gibi kaynak banyosunun küçük olmasına neden olmaktadır. Bunun sonucu kaynak yapılan parçanın birim uzunluk başına ısı girdisi diğer kaynak yöntemlerine göre düşüktür. Dolayısıyla dar kaynak bölgesi, daha az çarpılma etkisi (distorsiyon) ve hatasız kaynak imkanı ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.11'de elektron ışın kaynağı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Elektron ışın kaynağının şematik görünüşü.

EBW yöntemi dar kaynak boyutu ve yüksek birleşme gerilimi sağlar. Bu yöntemle, ince parçaların kalın parçalara kaynağı ve benzer olmayan malzemelerin kaynağı kolaylıkla başarılabilir. EBW yöntemi ile reaktif refrakter malzemelerin birleştirilmesi kolaylıkla yapılabilir.

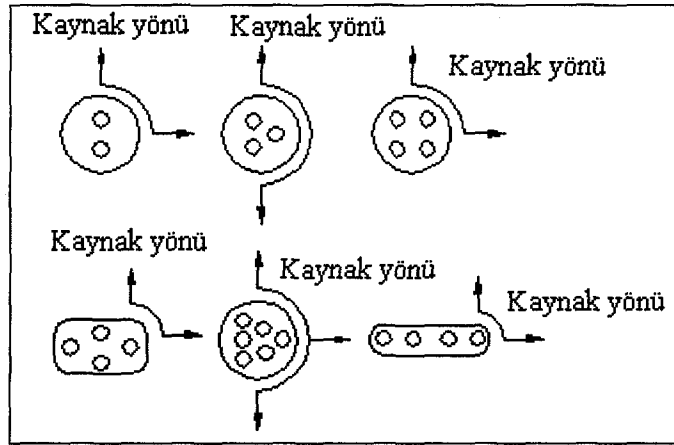
4.4.2.3. Tozaltı Kaynağı (SAW)

Tozaltı kaynağı, çıplak bir elektrot ile iş parçasında ark oluşturarak, kaynak bölgesindeki korumanın bir toz kümesi ile sağlandığı kaynak yöntemidir. Elektrot ve toz kaynak bölgesine otomatik olarak gelir. Arkı oluşturan elektrik akımı temas bölgesi boyunca elektrotla sağlanır. Akım elektrotun pozitif veya negatif kutup olduğu doğru akım (DC) olabileceği gibi, alternatif akım da (AC) olabilir. Kaynak tamamlandıktan sonra kaynak metali katılaşır. Birleşmemiş kısımlar ve cüruf kalkar (Ogborn, 1993).

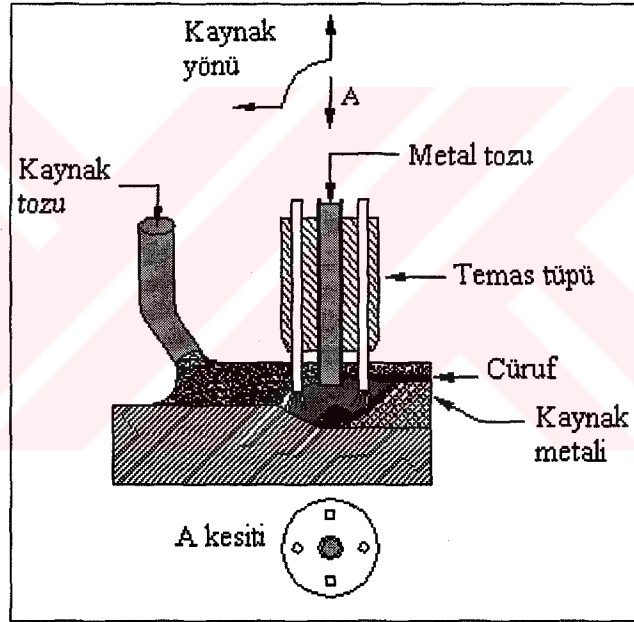
Tozaltı kaynağı oldukça yüksektir. Bir paso ile 85 mm, iki paso ile 180 mm ve çok paso ile 300 mm kalınlığa kadar parçaların kaynağını yapmak mümkündür. Kaynak yapılabilecek en ince malzeme 1.2 mm'dir. Kalın parçalar bu kaynakla kaynatılacağı zaman elektrot çapı da artar. En küçük elektrot çapı $\varnothing 2.4$ mm'dir.

Tozaltı kaynağında kaynak verimliliğini arttırmanın birkaç yolu vardır. Bunlar çoklu tel kaynağı, sıcak tel kaynağı, soğuk tel kaynağı ve toz ilavesiyle yapılan kaynak şekilleridir. Çoklu tel kaynağında tüm teller kaynak nozuluna doğru aynı hızda eş zamanlı olarak hareket ederler. Sistem, bir kaynak hızı kontrol ünitesine sahiptir ve sadece bir güç kaynağından güç sağlar. Kaynak nozulundaki teller kaynak yönüne göre paralel, ard arda veya üçlü formda düzenlenebilirler. Şekil 4.12'de mümkün olabilecek tel düzenlemeleri görülmektedir. Tel düzenleri kaynak alanına metal tozunun sağlanışına ve kullanım amacına bağlıdır. Örneğin, yüzey modife edilecekse, onların kaynak yönünde birbirine paralel şekilde hareket etmesi bakımından yanyana düzenlenmesi gerekir. Teller arasındaki mesafe metal tozu sağlama yoluna, tel çapına, kaynak parametrelerine ve tel uzamasına

bağlıdır. Yüzey serleştirme için yaklaşık 50 Volt civarındaki yüksek bir voltaj önerilir. Bu yolla iyi, düzgün üniform kaynak kalınlıkları sağlanabilir (Tusek ve Suban, 2003). Şekil 4.13’de dört elektrotlu merkezden metal toz ilaveli tozaltı kaynağı sistemi görülmektedir.



Şekil 4.12: Tozaltı kaynağında mümkün olabilecek tel düzenlemeleri (Tusek ve Suban, 2003).

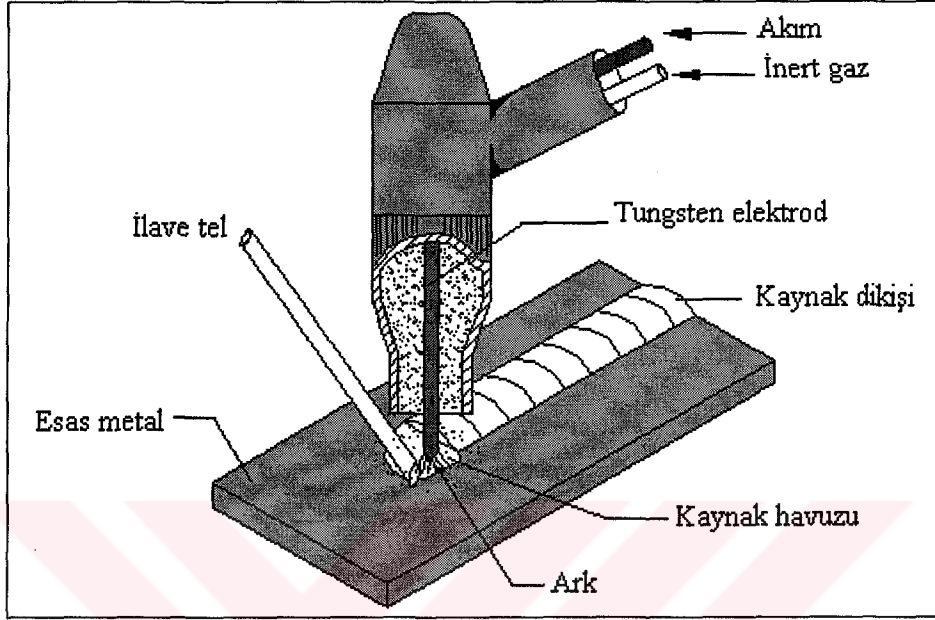


Şekil 4.13: Dört elektrotlu merkezden metal toz ilaveli tozaltı kaynak sistemi (Tusek ve Suban, 2003).

4.4.2.4. Gaz Tungsten Ark (GTA) Kaynağı

Gaz tungsten ark kaynağı (TIG veya GTA), ergimeyen bir tungsten elektrot ile iş parçası arasındaki ark ile gerekli olan ısı enerjisinin üretildiği ve kaynak bölgesinin, elektrodun koruyucu bir gaz örtüsü ile korunduğu bir gaz altı kaynak yöntemidir (Minnick, 1996).

Gaz tungsten ark kaynağının ilk uygulaması Rusell Meredith ve V.H. Pauleka tarafından magnezyum kaynağı için yapılmıştır. Onlar ısı için DC akım türünü, koruyucu atmosfer olarak da helyumu kullanmışlardır. Yöntemde arkın oluşması ve koruyucu atmosfer olarak helyumun kullanılması “Heliark” kavramının gelişmesine yol açmıştır (Minnick, 1996). Şekil 4.14’de gaz tungsten ark kaynağının prensibi verilmiştir.



Şekil 4.14: Gaz tungsten ark kaynak yönteminin prensibi

Tungsten elektrottan iş parçasına herhangi bir metal transferi olmadığından, ark sadece esas malzemeyi ergitmek amacıyla kullanılır. Elektrik arkı, iyonize olan asal gazdan akımın geçmesiyle üretilir. İyonize olan gaz atomları elektron kaybederek pozitif yüklenirler. Elektronlar negatiften pozitif doğru hareket ederken pozitif yüklü gaz iyonlarının akışı ile artı yüklü pozitif kutuptan negatif kutba doğru hareket iletilir.

Kullanılan koruyucu gazlar; argon, helyum, azot ve bunların karışımları şeklindedir. Yaygın olarak kullanılan koruyucu gaz argondur (Lucas ve diğ., 1990).

Tungsten elektrot, ark işlemi için gerekli elektronların emisyonu için yeterince yüksek sıcaklıklara ısıtılır. Kaynak havuzunun sıcaklığı 2800 °C olabilmektedir (Hicken, 1993).

Gaz tungsten ark kaynağının kalitesi, kaynak havuzunun geometrisi ile karakterize edilir. Kaynak havuzunun geometrisi, kaynağın mekaniksel özelliklerini tespit etmekte önemli rol oynar. Bu yüzden optimum kaynak havuzunun geometrisini elde etmek için kaynak yöntem parametrelerinin seçimi önemlidir.

Bu parametrelerden en önemlisi kaynak akımıdır. Çünkü kaynak akımı nüfuziyet, kaynak hızı, yığılma oranı ve kaynak kalitesi ile bire bir ilişkilidir. GTAW yönteminde, doğru akım elektrot negatif

(DCEN), doğru akım elektrot pozitif (DCEP) ve alternatif akım (AC) olmak üzere üç akım türü kullanılmaktadır (Hicken, 1993).

Alternatif akım, elektrot ve iş parçasındaki kutuplamanın çevrimiyle kendisini belli eder. Kutuplamadaki bu hızlı değişim, alüminyum ve magnezyumun kaynağındaki oksit tabakasını kaldırmakta yararlı bir işlem olan katodik temizleme işlemi için önemlidir (Hicken, 1993).

DCEN (elektrot negatif) kutuplamada, DCEP (elektrot pozitif) de elektrotta olabilecek aşırı ısıma olayı meydana gelmez. DCEN kutuplamada parçaya doğru hareket eden elektronlar malzemeye çarparak ısı üretir ve böylece malzemede derin ve dar bir nüfuziyet oluşması sağlanır. DCEP de ise, parça yerine elektrot ısınır. Burada oluşan temizleme etkisi AC'de meydana gelen temizleme etkisine göre daha düşüktür. Çünkü pozitif kutuplanmış elektrodun kuvvetli şekilde ısınması, akımın şiddetini zayıflatır.

Kullanılan koruyucu gazın görevi; ark bölgesi ve kaynak banyosunun üzerindeki havayı kimyasal, metalurjik ve fiziksel bileşik oluşturmada dışarı atarak dikişi O_2 ve N_2 gazlarının etkisinden korumak; kaynak metalinin soğuma hızının ayarlanmasına katkıda bulunmak; istenen ark karakteristiğini ve damla geçişini sağlamaktır. Koruyucu gazlar, sadece katılaştan kaynak banyosunu korumakla kalmamakta, ark kararlılığı, kaynak dolgu biçimi, dikişin mekanik özellikleri, kaynak nüfuziyeti, tane yapısı, işlem verimliliği, sıçrama ve duman oluşumu gibi önemli değişkenleri de etkilemektedir. Dikiş genişliği, dikiş yüksekliği ve dikiş nüfuziyeti; kullanılan malzeme ve seçilen koruyucu gaz türüne göre değişir. Sadece tek gaz ile yapılan kaynakta, ana malzeme üzerinde önemli bir faydası olmayan dikiş yüksekliği, fazla kaynak dikişine yol açmaktadır. Çeşitli gaz karışımları kullanıldığında, dikiş yüksekliği ortalama değerlerinde kalmakta, dolayısıyla bu suretle düzgün görünüme sahip bir dikiş formu elde edilmektedir. TIG kaynağında helyum (He), argon (Ar), azot ve bunların karışımları kullanılır. Argon ve helyum tek atomlu bir gaz iken, azot diatomik (çift atomlu) bir gazdır. Azot gazı yüzeye yapışarak yüzeyde bileşik oluşturur. Azot, argon ve helyumdan daha fazla enerji transfer etme yeteneğine sahiptir. Bu yüzden argon gazına ilave edilerek yüksek ısı iletkenliğe sahip olan bakır gibi malzemelerin kaynağında büyük önem taşır. Azot gazının ferritik çeliklerin ve paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanımı sakıncalıdır. Çünkü azot, kaynak havuzunda tokluğun ve korozyon direncinin azalmasına neden olur (Lucas ve diğ., 1990).

Argon ve helyum gazı pasif gazlardır. Bu yüzden diğer elementlerle birleşmezler; renksiz ve kokusuz olup yanmazlar. Helyum gazı havadan hafif, argon gazı ise havadan daha ağırdır. Dolayısıyla helyum uçucudur ve koruma kabiliyeti düşüktür. Argon havadan ağır olması nedeniyle ergimiş metali daha iyi korur (Hicken, 1993).

Helyumun iyonizasyon enerjisi oldukça yüksektir (25,5 eV). Dolayısıyla da uzun bir ark boyuna gerek duyulur. Bu da ark gerilimini yükseltir. Sonuçta $Q = I.V.t$ (kJ/cm) formülü uyarınca ısı girdisi artar. Bu yüksek ısı girdisi; yüksek iletkenliğe sahip bakır, alüminyum ve diğer malzemelerin

kaynağı için yararlıdır. Helyum gazı, DCEN kutuplama ile kullanıldığı takdirde, kalın alüminyum levhaların kaynağında oldukça verimli olmaktadır (Hicken, 1993).

Argon helyuma göre daha düşük iyonizasyon enerjisine sahiptir (15,7 eV). Bunun için kolayca plazma meydana getirir. Ark kararlı ve sakin yanar. İyi bir elektrik iletkenliğine sahiptir. Isı iletkenliği kötüdür. Kaynak banyosunun yüzey gerilimi yüksektir; sıçrama yapar ve tipik argon parmağı şeklinde nüfuziyet sağlar. Ark gerilimi düşük olduğundan ısı girdisi azalır. Argon helyuma göre 10 kat daha ağırdır. (Bu gazların özgül ağırlıkları Ar: 1,7839 kg/Nm³; He: 0,1785 kg/Nm³'tür). Diğer taraftan argon havadan da ağır olduğu için kaynak yerini daha iyi korur ve sarfiyatı da helyumdan daha azdır.

Helyum ve argon karışımı altında yapılan kaynakta oluşan yüksek kaynak sıcaklığından ötürü esas metal iyi bir şekilde ergir ve tam bir birleşme sağlanır. Yüksek kaynak banyo sıcaklığı ve düşük yüzey gerilimlerinin oluşması istenen uygulamalarda, iki gazın iyi özelliklerinden faydalanılarak gazaltı kaynağında koruyucu gaz olarak Ar/He karışımları kullanılır. Böylece kaynak yerinde oluşan ısı, isteğe bağlı helyum miktarının fazlaşması veya azaltılması ile sağlanır. Helyum miktarı arttıkça viskozite azalır, nüfuziyet iyileşir ve kaynak hızı yükselir.

TIG kaynağında kullanılan elektrotlar "ergimeyen tip" elektrotlardır. TIG kaynağı için beş tip elektrot vardır ve elektrot seçiminde bazı önemli faktörler bulunur. Bunlar; kaynatılacak malzemenin cinsi, kalınlığı, kullanılan akımın tipi, seçilen koruyucu gaz türü vs.' dir. Tablo 4.2'de tungsten elektrot çeşitleri ve özellikleri verilmektedir.

Tablo 4.2: Tungsten elektrot çeşitleri ve özellikleri

AWS	% Tungsten min.	% Toryum Katkısı	% Zirkonyum Katkısı	% Diğer elementler maks.	Renk kodu	Ergime derecesi (°C)
EWP	99.5	-	-	0.5	Yeşil	3400
EWTh-1	98.5	0.89-1.2	-	0.5	Sarı	4000
EWTh-2	97.5	1.7-2.2	-	0.5	Kırmızı	4000
EWTh-3	98.5	0.35-0.55	-	0.5	Mavi	4000
EWZr	99.2	-	0.15-0.40	0.5	Kahverengi	3700

Saf tungsten elektrotlar, AC için iyi bir kararlı ark ve yuvarlak uç sağlar. Oksit ve nitrür oluşumuna karşı iyi bir dirence sahiptir.

Toryumlu tungsten elektrotlara toryum ilave edilmesinin nedenleri;

- Arkı kolay başlatmak,
- Geniş bir akım aralığı kullanmak,
- Uçta ergime olmamasını sağlamak,
- Yapışmaya karşı meyli azaltmak,
- Kirlenmeye karşı daha yüksek direnç oluşturmaktır.

Arkı kolay kaplatmak, yüksek akım kapasitesi sağlamak ve kaynak havuzunun kirlenmesine karşı direnci artırmak amacıyla hem % 1 toryumlu, hem de % 2 ve % 3 toryumlu elektrotlar kullanılır ve bunlar daha uzun hizmet ömrü sağlarlar.

Zirkonyumlu tungsten elektrotlar, saf tungsten elektrotların arzulanan özellikleriyle toryumlu tungsten elektrotların arkı kolay başlatma özelliğinin kombinasyonuna sahiptir.

TIG kaynağında DCEN kutuplamada, elektrot negatif kutba bağlı olup elektron akışı (e) elektrottan iş parçasına doğrudur ve bunun sonucunda da ana levha bir hayli ısınırken, elektrot göreceli olarak soğuk kalır. Pozitif kutba bağlanan parçaya yapılan elektron bombardımanı ile dar ve derin bir nüfuziyet sağlanır. Fakat arkın ergimiş banyoda elektriksel bir temizleme etkisi yoktur. Yüzeyde oluşan doğal oksit tabakası nedeniyle, hafif metallerin kaynağı için böyle bir kutuplama şekli uygun değildir. Buna rağmen, bakır ve paslanmaz çelik gibi malzemelerin kaynağı için gayet elverişlidir. DCEN kutuplamalı TIG kaynağı sistemi alüminyum yüzeyinden oksit filmini kaldırmak için hiçbir temizleyici etki sağlamadığından, kaynak öncesinde özenli bir temizleme ve oksidin kazınması gerekir. Doğru akım elektrot negatif kutuplama arkındaki yüksek akım yoğunlaşması yanma kerkiklerine yol açabilir. Kaynak esnasında, önceki pasodan artakalan artık ve oksit filmini kaldırmak için tel fırça ile temizlemek gerekir.

Doğru akım elektrot pozitif kutuplu TIG kaynağında gerekli teçhizat, DCEN kutuplamada kullanılanın aynısı olup, sadece üfleç ve iş parçasının bağlandığı kutuplar değişiktir. DCEP kutuplu TIG kaynağında, elektrot pozitif (+) kutba bağlandığı zaman ters kutuplama söz konusu olur. Bu durumda ark, ergimiş banyoda büyük bir elektriksel temizleme etkisi gösterir, oluşan katodik leke oksit tabakasını parçalar ve elektrot aşırı ısınır. Örneğin DCEP’de 6,5 mm çapında elektrot kullanılırken bu çap DCEN’de 1,6 mm’dir. Elektrot çapının küçük tutulması halinde, elektrodun ucu fazla ısınacak ve oluşacak damla kaynağa bulaşacaktır. Böyle bir kutuplama hafif metallerde ince sacların kaynağında kullanılır.

Alternatif akım (AC) ile yapılan kaynakta bir uzlaşma mevcuttur. Negatif yarım dalga esnasında anot alan kaynak banyosu ısınır ve bunu takip eden pozitif yarım dalga ile de bir temizleme tesiri elde edildiğinden, oksit tabakası parçalanır. Elektrot da aşırı bir ısınma mevcut değildir. AC TIG kaynağı, göreceli olarak ince kesitli alüminyum parçaların kaynağında kullanılır. 0,025-8,5 mm kalınlıklı malzemeler katkı metalsiz ve ön ısıtmasız olarak kaynak edilebilir. Daha kalın malzemelere ise ön ısıtma gereklidir.

Yüksek sıcaklıkta ergiyen oksit tabakası içeren malzemede katı oksit tabakası, kaynak banyosunun akmasını ve damlaların üzerine düştüğü paso ile birleşmesini engeller. Alüminyum oksit (Al_2O_3) yaklaşık 2050 °C’lik ergime sıcaklığıyla, ergitme kaynağında çok zor parçalanabilen oksitlerden biridir. TIG kaynağında bu tabakanın uzaklaştırılması, arktaki yük taşıyıcılarla sağlanır. Yük taşıyıcılar, elektronlardan ve elektronların ayrılmasıyla oluşan pozitif yüklü gaz iyonlarından oluşur. Elektronlar büyük hızlarda hareket ederler. Ancak, kütlelerin küçüklüğü nedeniyle kinetik

enerjileri azdır. Bu nedenle sadece iyonlar, esas malzeme yüzeyine çarptıklarında, yüzeyi oksit tabakalarından ayırmak için yeterli enerjiye sahiptirler.

Kare dalga alternatif akım veren kaynak makinaları değişik üstünlükler sunmaktadır. Bunlar da hızlı şekilde devreye giren transistörlerin yardımıyla kaynak makinasının kesintisiz şekilde değişen pozitif ve negatif kutbu elektroda aktarılmaktadır. Günümüzde bu tip kaynak makinaları yerine inverterler kullanılmaktadır.

TIG kaynağı; elle, yarı otomatik ve tam otomatik olmak üzere üç şekilde yapılır. Bu yöntemlerden hangisinin kullanılacağı, teçhizata ve uygulamaya bağlıdır. Elle kaynakta, kaynağın her parçasını kaynakçı kontrol eder. Yarı otomatik kaynakta torç özel bir tutucuyla sabitlenir. Kaynakçı yöntem değişkenlerini rahatlıkla kontrol edebilir. Tam otomatik kaynakta, tüm kaynak parametreleri kaynak makinasına programlanır. Uzman kaynakçı tüm işlemi bir monitörden kontrol ve idare eder (Minnick, 1996).

TIG kaynağının avantajları;

1. Tamamlanmış kaynakta korozyon etkili artıkların temizlenmesine gerek yoktur. Çünkü pasif gaz akışı ergimiş metali anot ve oksijenin zararlı etkilerinden korur.
2. Kimyasal bileşim bakımından, kaynak genellikle esas metale doğru birleşimi dengeler. Bu yöntemle sağlanan kaynak; diğer yöntemlerle yapılan kaynaklara göre daha dayanıklı, korozyon etkilerine karşı daha dirençli ve sürekli dir.
3. Kaynak, tüm pozisyonlarda kolaylıkla yapılabilir. Kaynak üzerinde cüruf oluşmaz.
4. Kaynak bölgesi kolaylıkla gözlenebilir. Duman oluşumu gözlenmez ve kaynak metali temizdir.
5. Kaynağın birleştirdiği esas malzemede çarpılma etkileri minimum düzeyde gerçekleşir. Isı, küçük bir ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) oluşumu ile, küçük bir alanda odaklaşır.
6. Metali temizleme problemlerine yol açabilecek sıçrama olmaz. Hiçbir metal artıktan karşı metale geçmediği için, bu problemle karşılaşılmaz.
7. Pratik olarak endüstride kullanılan tüm metal ve alaşımları değişik kalınlık ve birleştirme türlerinde TIG yöntemi kullanılarak kaynak edilebilir.
8. TIG kaynağı özellikle alüminyum ve alaşımlarında, magnezyum ve alaşımlarında, paslanmaz çelikte, nikel ve nikel esaslı alaşımlarda, bakır ve alaşımlarında, bazı pirinç alaşımlarında, düşük alaşımlı ve sade karbonlu çelikte ve çeliğin sertleştirilmesinde kullanılır.

Gaz Tungsten Ark Kaynak (GTA) Yöntemi İle Yüzey Alaşımlama

GTA yüzey modifikasyonu; alt tabaka malzemesinin ince bir kısmı ve uygun birleşimli alaşım tozundan üretilen bir yöntem olup, ergime her iki malzemede de aynı anda gerçekleşmekte ve bundan hemen sonra hızlı katılaşarak, kaplama malzemesi ile esas metalin metalurjik olarak bağlanma esasına

dayanır. Bu şekilde en mukavemetli yapı elde edilmiş ve aşınmaya karşı büyük bir direnç oluşturulmuş olur. Yüzey alaşımlama yönteminde kaynak kabiliyeti önemlidir ve işlemten önce toz alaşımı ile alt tabakanın özellikleri iyi bilinmeli ve kaynak kabiliyeti iyi belirlenmelidir.

Mridha ve arkadaşları (2001), TIG kaynak yöntemini kullanarak titanyum alaşımının yüzeyine Ti-Al (% 53 Ti + % 47 Al) toz partiküllerini geçirterek intermetalik kaplama oluşturmaya çalışmışlardır. Öncelikle 50 µm tane iriliğinde ve % 99 saflıktaki titanyum ve 150 µm tane iriliğinde ve % 98 saflıkta alüminyum tozu karıştırıp kullanmış, 100x50x5 mm ebatlarındaki saf titanyum levha üzerinden tozun pasif gaz akışı esnasında oluşan basınç ile uzaklaşmaması için, tozu bir bağlayıcı ile bağlanmıştır. Optimum bağlayıcı miktarı belirlenmiştir. Çünkü gerekenden fazla bağlayıcı kullanımı yapıda boşluk oluşumuna yol açmaktadır. Hazırlanan toz tabakasının kalınlığı 0,6-1 mm olarak saptanmıştır. Kaynak akımı olarak 50-100 A kullanılmış olup, kaynak hızı 120-240 mm/dak'dır. Deney sonucunda alaşımlanmış yapıda Ti-Al elementlerinden oluşan intermetalik bileşikler meydana gelmiştir. Bunun sonucunda ulaşılan sertlik değeri 500-600 HV olup, yüzeyden içeriye doğru bu değer gittikçe azalmıştır. Bunun yanında iyi aşınma direnci davranışları gözlenmiştir.

GTA ile Kaplamada Çift Tel Kullanarak Yığılma Oranının Arttırılması

Düşük alaşımlı malzemelerin üzerine paslanmaz çelik ve süper alaşım malzemelerinin kaplanması, arzu edilen korozyon veya aşınma direncini sağlamak amacıyla endüstriyel uygulamalarda çok uygun maliyetli bir işlemdir. Örtülü elektrot ile ark (SMA), gaz-metal-ark (GMA), tozaltı (SA), gaz-tungsten-ark (GTA) ve plazma ark (PA) gibi ergitme kaynak yöntemleri, kaplama amacıyla yaygın olarak kullanılır. GTA ve PAW yöntemleri ile çok kaliteli kaplamalar üretilir. Çünkü her iki yöntemde de yüksek ark kararlılığı, sıçramaların olmayışı, kaynak bölgesinin pasif gaz ile korunması ve kaynak değişkenlerinin kontrolünün hassas olması tercih nedenidir. Örneğin, GTA ile kaplama, uçak motoru parçaları gibi hassas olması gereken uygulamalarda kullanılır. GTA ve PAW ile çok mükemmel kaplamalar elde edilmesine rağmen, GMA ve SAW ile karşılaştırıldığında daha düşük yığılma oranına sahiptir.

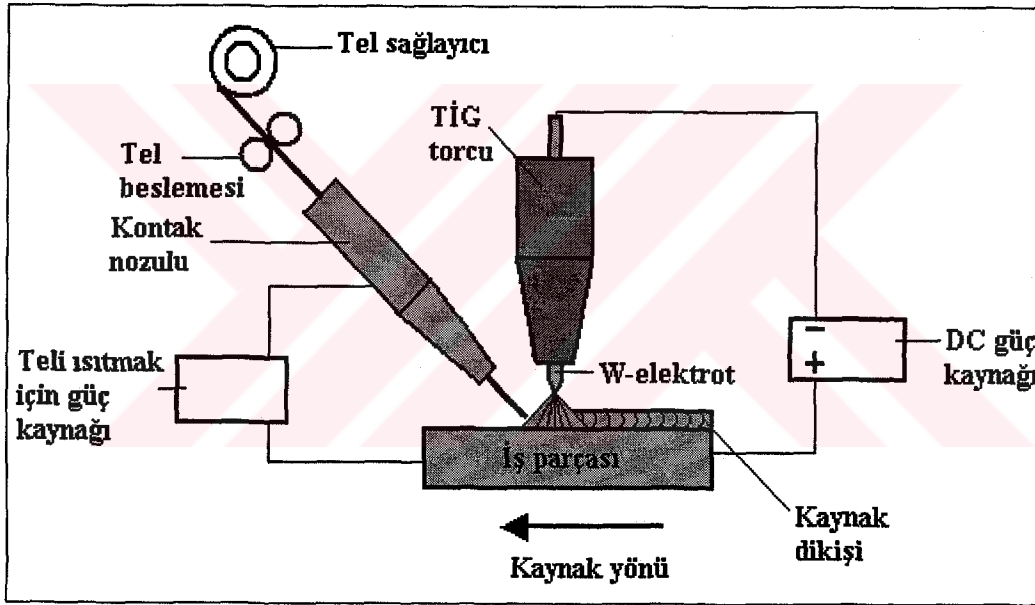
Yığılma oranını arttırmanın bir yolu sıcak tel yöntemidir. Bu teknikte ergime verimliliğini arttırmak için, tel kaynak havuzuna (bölgesine) verilmeden önce ısıtılır. Çift tel tekniği GMA kaynağı ve kaplama uygulamalarında kullanılmasına rağmen, GTA ile çift tel tekniğinin kullanımı şimdiye kadar fazla çalışılmamıştır. Yapılan çalışmalarda; çift tel konik biçimli gaz tungsten arkının altına kolaylıkla yerleştirilir. Çift tel, tek telden daha fazla ısı tüketir. Bu yüzden alt malzemeye daha az ısı girişi olur. Sonuç olarak daha az nüfuziyet, daha küçük ısı etkisi altında kalan bölge (HAZ) (% 35 daha küçük) oluşumu ve daha az çarpılma olur ve yığılma oranı da (% 50) artma gösterir (Sun ve diğ., 1999).

Soğuk Tel Beslemeli GTA Kaynağı (Cold-Wire GTA Welding)

Soğuk tel besleme sistemi; elle, yarı otomatik ve tam otomatik olarak uygulamada kullanılır. Bu sistemlerde, hem sert (çelikler, paslanmaz çelikler, vs.) hem de yumuşak (alüminyum, magnezyum, vs.) teller kullanılabilir. Teçhizatın uyumu ile farklı çaptaki teller (0.58-1.58 mm) kullanılabilir. GTA yönteminde kullanılan tel rulo biçimindedir. Bu da yöntemin basit olması ve kolay kurulmasını sağlar. Bu yöntem, yüksek kaliteli kaynakların oluşmasını sağlar (Minnick, 1996; Richardson, 1995).

Sıcak Tel Beslemeli GTA Kaynağı (Hot-Wire GTA Welding)

Basit bir sıcak tel beslemeli GTA kaynak sisteminde, tel kaynak banyosuna verilmeden önce bir güç kaynağı tarafından ergime noktasına kadar ısıtılır. Bu özellik dışında bu yöntem soğuk tel beslemeli yöntemle benzerlik gösterir. Bu yöntem, sadece yarı ve tam otomatik sistemlerde kullanılır. Bu yöntemin iki avantajı vardır. Bunlardan ilki yüksek yığılma oranlarının elde edilmesi ve düşük üretim maliyetidir. Diğerisi ise, mükemmel kaynak kalitesidir. Şekil 4.15’de sıcak tel beslemeli GTA sistemi verilmiştir.



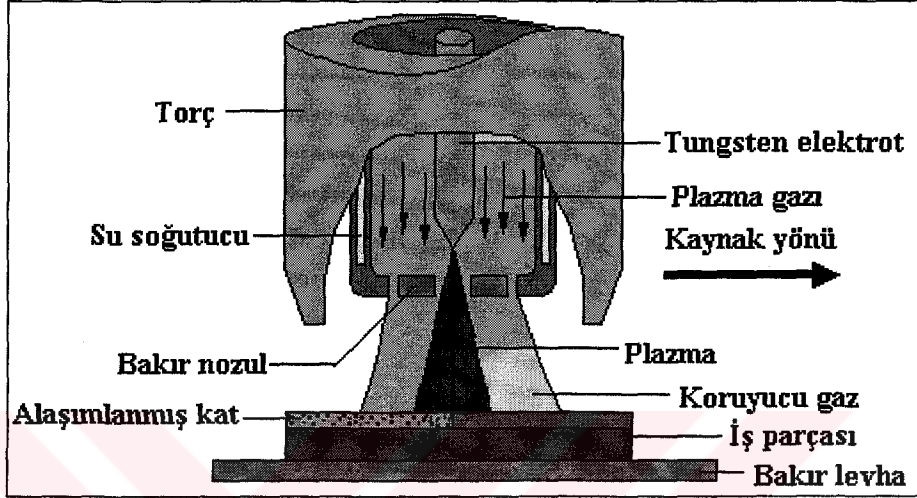
Şekil 4.15: Sıcak tel beslemeli GTA sistemi (Minnick, 1996)

4.4.2.5. Plazma Ark Kaynağı (PAW)

Plazma ark kaynağı bir tungsten elektrot ve iş parçası arasında oluşturulan bir ark ile ısı transferi yoluyla metallerin birleştirilmesinde kullanılan, koruyucu gaz ark kaynak yöntemi olarak tanımlanabilir. Ark, yüksek yönlenme şiddeti sağlamak amacıyla bakır alaşımlı bir nozul içinde daraltılır (Şekil 4.16). Plazma, plazma gazının bir kısmının iyonizasyonu ile oluşturulur. Yöntem bir ilave kaynak metali kullanarak ya da kullanmayarak uygulanabilir (Harris, 1993).

Plazma ark kaynağında genelde kullanılan elektrotlar, tükenmeme özelliğine sahip % 2 toryumlu tungsten elektrotlardır. Yani kaynağın uygulanmasında, tercihen bileşiminde % 2 toryum bulunan elektrotlar kullanılır (Harris, 1993).

Bu yöntemde kullanılan plazma, arkı üretmek amacı taşır. Koruyucu gaz ise kaynak havuzunu katılaşma ve soğuma esnasında atmosferin olumsuz etkilerinden korumak için kullanılır. Koruyucu gaz hemen hemen her zaman argondur. Gazın özellikleri hem kaynak şeklini hem de kaynak kalitesini etkiler. Bunlara ilaveten kaynak kalitesini; akış oranı, akım aralığı, kaynak hızı ve kaynak tasarımı belirler (Harris, 1993).



Şekil 4.16: PAW ile yüzey alaşımlama

PAW yöntemi, geniş kalınlık aralığı bulunan paslanmaz çeliklerde yaygın olarak uygulanır. Hatta yöntem karbonlu ve alaşımlı çeliklere, alüminyum alaşımlarına, titanyum alaşımlarına, bakır ve nikel alaşımlarına; ayrıca zirkonyum ve tantal gibi farklı özellikli malzemelere de uygulanabilir (Harris, 1993).

PAW yöntemi ile ayrıca yüzey alaşımlama yoluyla yüzey modifikasyonu da yapılabilir. Kim ve arkadaşları, krom-bor toz karışımını kullanarak, plazma arkını yüzeye transfer edip (PTA), malzemenin aşınma özelliklerini incelemişlerdir (Bourithis ve diğ., 2002).

Bourithis ve arkadaşları (2002), yaptıkları bir çalışmada AISI 1018 çeliğinin yüzeyine PTA yöntemini kullanarak bor tozlarını geçiştirmişlerdir. Bu çalışmada 1300 µm kalınlığında örtü tabakası elde edilmiş ve yüzey sertliği 1000 HV olarak ölçülmüştür.

Plazma ark kaynağı 0.02-6 mm kalınlıktaki bir çok metal için çok iyi bir ısı kaynağı sağlar. Bu yöntem koruyucu metal ark kaynağı (SMAW), gaz metal ark kaynağı (GMAW) ve gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) gibi ark kaynak yöntemlerinden daha fazla avantajlara sahiptir. Çünkü PAW yöntemi, yüksek enerji konsantrasyonuna, iyi ark kararlılığına, yüksek ısı girdisine ve yüksek kaynak hızına sahiptir.

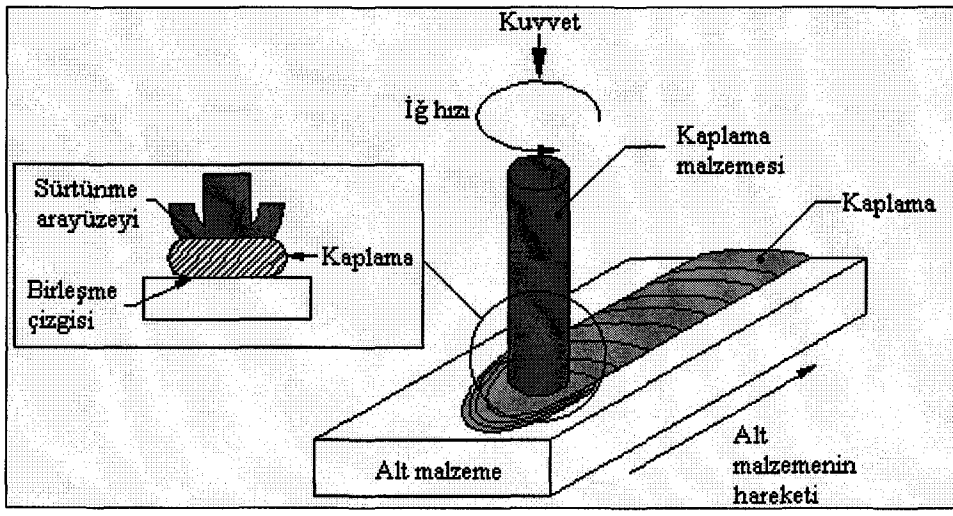
Sonuç olarak; PAW yöntemi SMAW, GMAW ve GTAW yöntemlerinden daha yüksek nüfuziyet kapasitesine sahiptir (Connor, 1987).

4.4.2.6. Sürtünme Kaynaklı Kaplama

Levha yüzeyine bastırılan ve dönel hareket ile sürtünen dairesel kesitli kaplama alaşımı ile oluşturulan bu kaplama yönteminin prensip şeması Şekil 4.17’de görülmektedir. Bu yöntem, bir katı hal yöntemi olup, sadece levha yüzeyine değil, dairesel kesitli aşınmış makina parçalarına da uygulanmaktadır. Yöntemin en büyük üstünlüğü; bir ergime olayı olmadığından parçalarda çarpılma (distorsiyon) oluşturmaması ve hızlı dolgu yapabilmesidir.

Yüksek sıcaklıklarda sıvı halde üretim esasına dayalı yüzey kompozitlerinin (surface composites) üretimi için var olan teknikler dikkati çekmektedir. Bu yöntemlerde takviye malzemesi ile metal matris arasındaki ara yüzey reaksiyonlarından ve bazı zararlı fazların oluşumundan kaçınmak zordur. Ayrıca işlem parametrelerinin, ideal katılaşmış mikroyapının oluşumu için ele alınması gereklidir. Yüzey kompozitlerinin üretimi, ana malzemenin ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda başarılabilirse, sözü edilen problemin üstesinden gelinebilir. Bu çalışmalarda, yeni bir üretim yöntemi olan sürtünme karıştırmalı üretim (FSP), alüminyum alaşımının yüzeyine seramik tanelerini birleştirerek, yüzey kompozitlerini oluşturmak amacıyla denenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı (FSW)) prensibine dayanan FSP, son yıllarda Mishra ve arkadaşları tarafından alüminyum alaşımlarının katı hal kaynağı için UK’un Kaynak Enstitüsü tarafından geliştirilmiştir (Scharma ve diğ., 2004). FSW yöntemi, son on beş yılda, metallerin birleştirilmesi açısından geliştirilen önemli bir ilerleme olup; alüminyum, titanyum ve diğer pek çok alaşım başarılı bir uygulama tekniğidir.

FSP’in prensibi son derece basittir. Pin ve destek (shoulder) ile dönen bir parça, mikroyapısal modifikasyonu sağlamak için tek bir malzeme halinde işleme sokulur ve belirlenen bölgeyi kaplamak için arzulanan çizgi boyunca hareket ettirilir. Dönen parça ile iş parçası arasındaki sürtünme, iş parçasında yumuşama ve plastikliğe yol açarak bölgesel ısınmaya neden olur. Bu yöntem sırasında malzeme yoğun bir plastik deformasyona maruz kalır ve bunun sonucunda önemli derecede tane küçülmesi meydana gelir. Bu çalışmanın amacı, FSP tekniğini kullanarak alüminyum alaşımının üzerine seramik parçacıkları birleştirerek yüzey kompozitlerinin oluşturulabilirliğini araştırmaktır.



Şekil 4.17: Sürtünme kaynaklı kaplama (Vitanov ve diğ., 2000).

5. AŞINMA

Aşınmanın tanımı değişik şekillerde yapılabilmektedir. En genel haliyle “mekanik ve kimyasal etkilerden dolayı malzemede istenmeyen partikül kaybı” olarak ifade edilebilir. DIN 50320 ve ASTM G 4093 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 (Korkut, 1997).

Genel olarak aşınma; yataklarda, pistonlarda, süpaplarda, tekerleklerde, kesici uç ve ağızlarında, dişlilerde, kırma ve öğütme değirmenlerinde, yol, toprak ve ziraat makinelerinde, türbin kanatlarında, maden cevheri üretim cihazlarında vb. yerlerde meydana gelmektedir (Korkut, 1997).

5.1. Aşınma Sisteminde Temel Unsurlar

Bir aşınmada temel unsurlar şunlardır:

- Ana malzeme,
- Karşı malzeme (aşındıran),
- Ara malzeme,
- Yük (temas kuvveti),
- İzafi hareket,
- Çevre.

Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte “Tribolojik Sistem” diye adlandırılır. Bir tribolojik sistemin standartlara uygun şematik olarak gösterimi Şekil 5.1’de görülmektedir.

a) Esas Malzeme (Aşınan): Fiziksel ve kimyasal özellikleri yanında, yüzey yapısı, şekil durumu tamamen belirli olan ve aşınma özelliği ile incelenen katı cisim şeklinde tanımlanabilir.

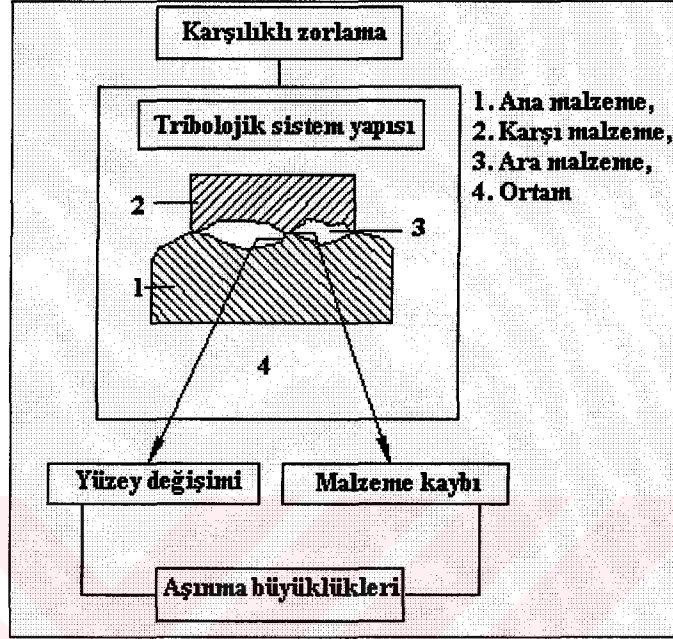
b) Karşı Malzeme (Aşındıran): Aşınmanın meydana gelmesinde başlıca öneme sahip olan karşı sürtünme elemanı, katı bir cisim, sıvı veya gaz olabilir. Bu temel eleman sürtünme elemanı ile birlikte bir aşınma çiftini oluşturmaktadır.

c) Ara Malzeme: Esas sürtünme elemanı ile karşı sürtünme elemanı arasında katı, sıvı, gaz, buhar ya da bunların karışımı şeklinde bulunan maddedir. Örneğin bu ara maddeyi yüzeyler arasına herhangi bir nedenle girmiş kum taneleri oluşturabileceği gibi, aşınma esnasında kopan parçacıklar da ara maddesi görevini üstlenebilir.

d) Yük (Temas Kuvveti): Etki eden kuvvetin büyüklüğü, türü (statik, dinamik, darbeli veya titreşimli olup olmadığı), doğrultusu ve zamana göre değişimi yüklemenin şiddetini belirleyen etmenleri oluşturur.

e) **İzafi Hareket:** Temel sürtünme elemanının karşı sürtünme elemanına göre izafi hareketinin cinsi (kayma, yuvarlanma veya çarpma etkilerinden hangisinin ağırlıkta olduğu), büyüklüğü ve doğrultusu ile belirlenir.

f) **Çevre:** Sistemi içine alan ve genellikle sıvı ya da gaz halinde bulunan ortamdır. Su, hava ve gazlar teknikte en sık rastlanılan çevre ortamlarıdır.



Şekil 5.1: Bir tribolojik sistemin şematik gösterimi

5.2. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınmayı etkileyen faktörler birçok farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu faktörler, aşağıda dört grup halinde verilmiştir.

- 1- Ana malzemeye bağlı faktörler:
 - a. Malzemenin kristal yapısı,
 - b. Malzemenin sertliği,
 - c. Elastisite (Young) modülü,
 - d. Deformasyon davranışı,
 - e. Yüzey pürüzlülüğü,
 - f. Malzemenin boyutu.
- 2- Karşı malzemeye bağlı ve aşındırıcının etkisi.
- 3- Ortamın etkisi:
 - a. Sıcaklık,
 - b. Nem,

c. Atmosfer.

4- Servis koşulları:

a. Basınç,

b. Hız,

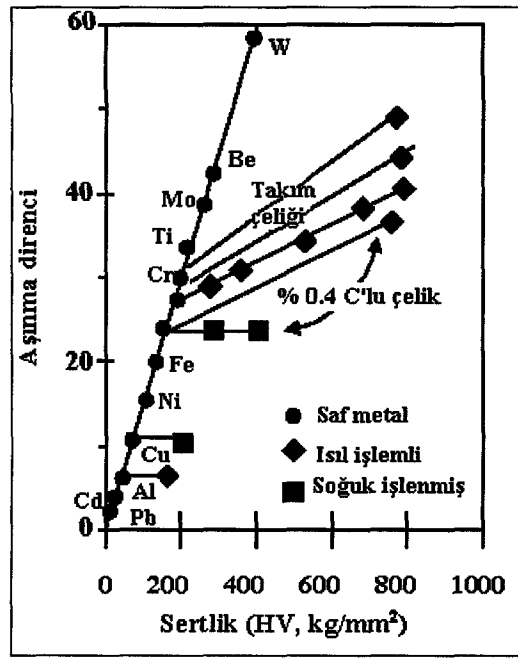
c. Kayma yolu.

5.3. Aşınma Direncine Karbürün Etkisi

Alaşımın mikro yapılarında bulunan karbürler aşınma direncini arttırmada önemli bir rol oynamaktadır. Mikro yapıda bulunan karbür miktarının artması ve karbürlerin irileşmesi abrasif aşınma direncini arttırmaktadır. Matris/karbür ara yüzeyinin mukavemeti, karbürler arası mesafe ve abrasif aşındırıcı ile farklı sertlikteki karbürlerin varlığı da alaşımların abrasif aşınma direncini etkilemektedir. Karbürlerin çok büyük ve sık dağılımı malzemenin sertliğini artırarak aşınma hızını azaltabilir. Aşındırıcı parçacıkların karbürlerden daha sert olması, aşınma esnasında karbürlerin kesilmesine ve çatlamasına neden olabilir. Bu durumda aşınma direncinde bir azalma olur.

5.4. Aşınma Direncine Matrisin Etkisi

Matris tarafından yeterli desteğin sağlanmasıyla abrasif aşınma sırasında karbürlerin dökülmesinin önlenmesi söylenebilir. Çoğu durumlarda, özellikle ağır abrasif aşınma koşulları altında çatlaklar önce karbür/matris ara yüzeyindeki yüksek gerilme birikimlerinden dolayı bu bölgelerde başlamaktadır. Daha iyi abrasif aşınma direncinin matris fazın artan mikro sertliği ile elde edilebileceği düşünülebilir. Her ne kadar sert ve saf metallerdeki sertlik ve aşınma direnci arasındaki ilişki Şekil 5.2'deki gibi doğrusal olsa da, çok bileşenli alaşımlar için hiçbir basit kural bulunmamaktadır. Abrasif aşınmada, aşınma yüzeylerinde deformasyon sertleşmesiyle aşınan yüzeyin sertliğini artır ve aşınma direnci büyük ölçüde aşınan yüzeyin sertliğine bağlı kalır. Matris mukavemetini katı eriyik sertleşmesi ile artırmak olasıdır. Bazı araştırmacılar yüksek mukavemetli matrisin, karbürlere daha iyi bir destek sağlayabileceğini ve ince yapıli taneciklerin daha erken dökülmesini önleyebileceğini ileri sürmektedir.



Şekil 5.2: İzafi aşınma direnci ile esas malzeme ile abrasifin sertliği arasındaki ilişki (Batchelor ve Stachowiak, 2000).

5.5. Aşınma Mekanizmaları

Temel aşınma çeşitleri olarak dört çeşit aşınma mekanizması vardır. Bunlar;

- Adhesif aşınma,
- Abrasif aşınma,
- Yorulma aşınması,
- Korozif aşınma.

Diğer aşınma mekanizmaları ise;

- Erozif aşınma,
- Öğütmeli aşınma,
- Oymalı aşınma,
- Kazımalı aşınma.

5.5.1. Adhesif Aşınma

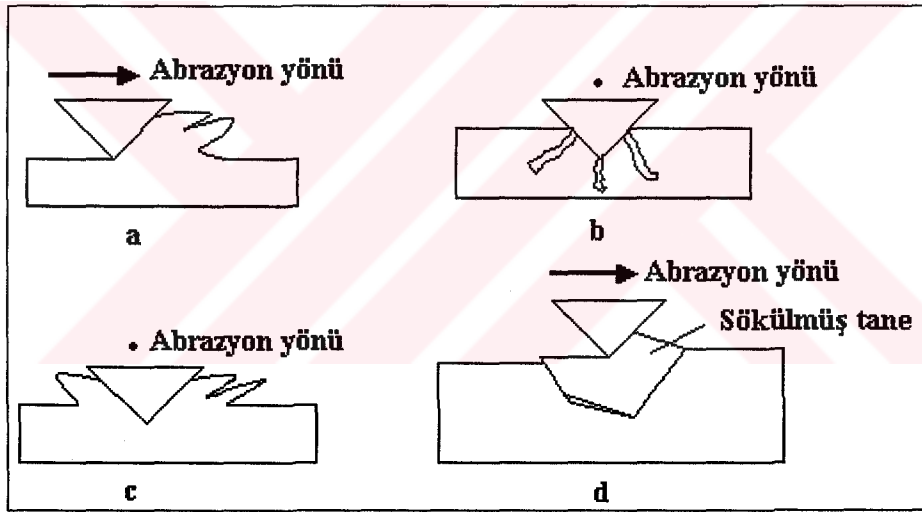
Özellikle birbiriyle kayma sürtünmesi yapan, metal-metal aşınma çiftinde meydana gelen kaynaklaşma olayının bir sonucudur. Birbiriyle temasta bulunan benzer kafes yapılı iki farklı karakterde metalik yüzeyi arasında adhezyon kuvveti denilen bir çekim kuvveti söz konusudur. Bu kuvvetin meydana gelebilmesi için malzemelerin moleküllerinin birbirine çok yaklaştırılması gerekir. Zaten temas halinde bulunan bu iki metal, birbiriyle yüzeylerindeki pürüzler vasıtasıyla etkileşirler. Malzeme ağırlığından veya bir dış kuvvet etkisiyle, çok küçük olan pürüz tepelerine gelecek olan basınç veya gerilme değeri çok büyük olur. Bu kuvveti taşıyamayan pürüzler plastik deformasyona uğrarlar. Eğer malzemenin deforme olma kabiliyeti yüksek ise, mikro adhezyon alanları şiddetle temas

yüzeyine tamamen yayılır. Böylece yüzeyde absorbe edilmiş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanır.

5.5.2. Abrasif Aşınma

Bir malzeme kendisinden daha sert veya eşit sertlikte olan bir başka malzemenin taneleri ile temas ettiği zaman abrasif aşınma meydana gelir. Bu problemin en yaygın alanı toprak işleme aletlerinin kırıncı kısımlarının aşınmasıdır. Abrasif aşınmanın kapsamı tahmin edilenden daha geniştir. Sert tanelerin varlığında, esas malzeme çok yumuşak olsa bile abrasif aşınma meydana gelebilir. Örneğin şeker kamışı gibi organik malzemelerde bile abrasif aşınma ortaya çıkar. Bitki liflerinde var olan silisyum dioksit (SiO_2)'in az bir sürtünmesinden dolayı, kamış keski ve kırıncılarında aşınma meydana getirir. Abrasif aşınmanın önlenmesi ve kontrol altına alınmasında en önemli faktör, aşınma mekanizmasının iyi bilinmesidir. Gerçekte var olan birkaç farklı mekanizma vardır. Bunlar farklı özelliklere sahiptirler (Batchelor ve Stachowiak, 2000).

Sert parçacıklar, tekrarlı deformasyon yoluyla meydana gelen yorulma, mikro kesme, mikro kırılma ve bazı tanelerin ayrılması yoluyla malzemeyi yüzeyden kaldıracaktır. Şekil 5.3'de abrasif aşınma mekanizmaları gösterilmiştir.



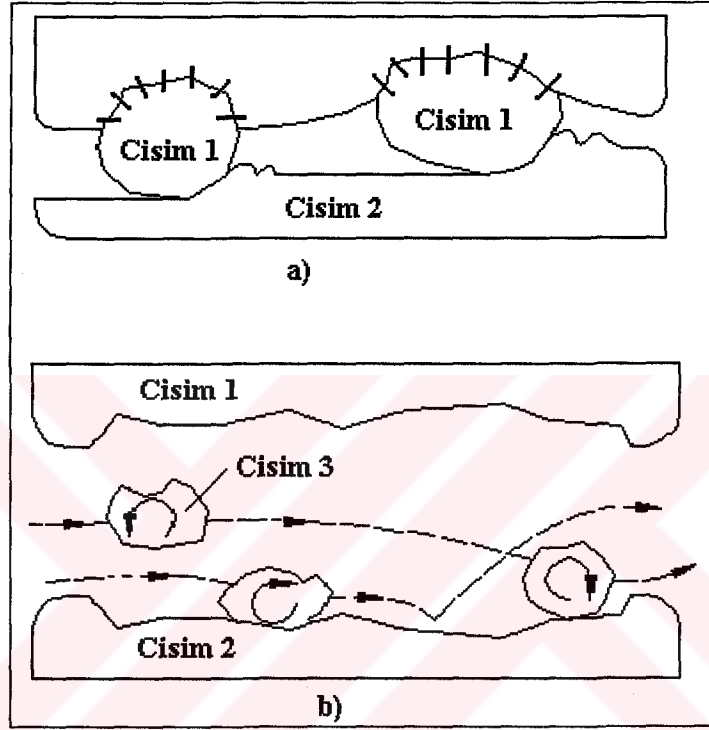
Şekil 5.3: Abrasif aşınma mekanizmaları: a) Mikrokese, b) Kırılma, c) Yorulma, d) Tane sökülmesi

Şekil 5.3a'da kesici tanelerin veya kum tanelerinin yumuşak yüzeyi kesmesi ile aşındırması gösterilmiştir. Kesilen malzeme aşınma izi (debris) gibi kaldırılır. Aşınan malzeme seramik gibi gevrek olduğu zaman, aşınmış yüzeyde kırılma meydana gelir (Şekil 5.3b). Aşınma izi (debris) çatlakların bir noktada birleşmesiyle oluşur. Sünük bir malzeme keskin olmayan tanelerle aşındırıldığı zaman kesme olmaz ve yıpranan yüzeyde tekrarlı bir deformasyon oluşur (Şekil 5.3c). Burada oluşan aşınma izi (debris) metalin yorulması sonucunda oluşur. Son mekanizma ise, tanelerin yüzeyden ayrılmasıdır (Şekil 5.3d). Bu daha çok seramik malzemelerde oluşur. Çünkü taneler arasındaki sınırlar zayıftır. Bu mekanizmada tüm tane aşınma izi olarak kaybolur (Batchelor ve Stachowiak, 2000).

Literatürde iki temel abrasif aşınma modeli vardır. Bunlar;

- a. İki cisimli abrasif aşınma
- b. Üç cisimli abrasif aşınmadır.

Zımpara kâğıdına tutulan malzemede meydana gelen aşınma iki cisimli aşınmadır. Burada taneler serbest değildir. Yüzeyde kesmeye benzeyen aşınma oluşur. Üç cisimli abrasif aşınmada taneler serbest olup, yüzeye dönerek çarparlar. İki cisimli ve üç cisimli abrasif aşınma modelleri Şekil 5.4’de verilmektedir.



Şekil 5.4: Abrasif aşınmanın modelleri: a) İki cisimli model, b) Üç cisimli model (Batchelor ve Stachowiak, 2000).

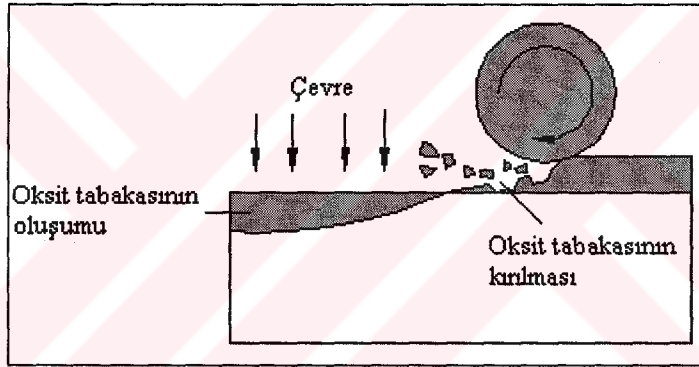
Son zamanlara kadar bu iki model çok benzer olarak düşünülmekteydi. Ancak bazı belirgin farklılıklar mevcut olmaktadır. Üç cisimli abrasif aşınmanın, iki cisimli abrasif aşınmaya göre on kez daha yavaş olduğu bulunmuştur. Çünkü üç cisimli abrasif aşınmanın, adhesif aşınma gibi diğer mekanizmalar ile tamamlanması gerekir. Üç cisimli abrasif aşınma için taneleri yüzeye iten aksamın sertlik gibi özelliklerinin önemli olduğu bulunmuştur. Fakat bu iki cisimli abrasif aşınma için söz konusu değildir. Üç cisimli abrasif aşınma, iki cisimli abrasif aşınmaya göre daha az malzeme kaldırılmasını içerir (Batchelor ve Stachowiak, 2000).

Aşındırıcı bir tane, yeterli ve hızlı bir abrasif aşınmaya sebep olduğu zaman o tane genellikle abrasif olarak tanımlanır. Hızlı abrasif aşınmanın meydana gelmesi için esas malzemenin sertliğinin,

aşındırıcı malzemenin sertliğinin 0.8'inden daha az olması gerekir. Ancak abrasif tanenin etkisiyle malzemede akma sınırı aşılmamışsa, malzeme yüzeyinde meydana gelen abrasif aşınma ve yüzey tahribi sınırlıdır. Abrasif tanenin ve esas malzemenin sertliği eşit oluncaya kadar, çok yavaş bir abrasif aşınma meydana gelir. Yumuşak fazlı bazı malzemeler veya tamamen sertleştirilmemiş malzemelerin sertliğinin abrasifin sertliğinin 1.2-1.4 katı kadar olana dek biraz aşınma olabilir (Batchelor ve Stachowiak, 2000).

5.5.3. Yorulma Aşınması

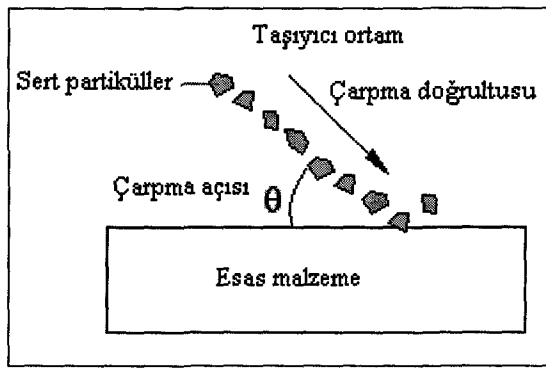
Titreşim (yorulma) aşınması, titreşim zorlamalarında yorulma kırılması hasarı olarak ortaya çıkar. Değişken, tekrarlı yüklemeler sonucu meydana gelir. Tribolojik zorlamalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden, yorulma aşınması birçok aşınma sürecinde ortaya çıkar. Sonuçta, malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur. Bu da; yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine neden olur.



Şekil 5.5: Yorulma Aşınması (Batchelor ve Stachowiak, 2000).

5.5.4. Eroziyon Aşınma

Erozyon, sıvı veya gaz ortamlar vasıtasıyla taşınan katı parçacıkların malzeme yüzeyine çarpması şeklinde meydana gelir. Parçacıkların yüzeye çarpma açısı küçük ise, abrasif aşınmaya benzer bir aşınma oluşur. Normal çarpma açısında ise, plastik deformasyon olur veya malzemeden parça kopması meydana gelir.



Şekil 5.6: Erozif Aşınma

5.5.5. Öğütmeli Aşınma

Öğütmeli aşınma, yüksek basınçlar altındaki parçacıkların metal yüzeyleri ile düşük hızlarda karşılaşmaları sonucunda, metal yüzeyinden parçacıkların kesilerek veya çok sayıda küçük çizikler oluşturarak koparılması ile meydana gelir.

5.5.6. Oymalı Aşınma

Oymalı aşınma, malzeme yüzeyinin çok yüksek gerilmelerdeki çarpma durumlarında, yüzeyden bir parçanın kesilmesi ya da kopmasıyla meydana gelir.

5.5.7. Kazımalı Aşınma

Kazımalı aşınma, karşılaşan yüzeylerde mikro kaynaşmanın meydana geldiği adhesif aşınmaya bir miktar benzemektedir. Aralarındaki fark ise, şu şekilde açıklanabilir. Adhesif aşınma birbirleri üzerinde kayan yüzeylerde meydana gelirken; kazımalı aşınma birbirlerine göre hareket etmeyen yüzeylerde meydana gelir. Ancak kazımalı aşınma, çok küçük genlikteki titreşim hareketinin (vibrasyon) görüldüğü sistemlerde, mikro kaynaşmanın olmasıyla meydana gelir.

5.5.8. Korozyif Aşınma

Abrasif aşınma ile kimyasal oluşumların birlikte ortaya çıktığı aşınma şeklidir. Tribooksidasyon aşınması adı da verilen korozyif aşınma durumunda, ana malzeme ile karşı malzeme arasında tribolojik zorlanmalardan ötürü meydana gelen kimyasal reaksiyon etkindir. Malzeme yüzeylerinin hava ile reaksiyona girerek oluşturduğu yüzey tabakaları (oksit tabakası) aşınmayı azaltmasına rağmen, bu yüzey tabakalarının tribooksidasyon sonucu özelliklerin değişmesi, aşınmayı hızlandırmaktadır. Yağ gibi kimyasal maddeler, bulunan ortamda çalışan makine parçalarının

yüzeylerinde oluşan yüzey tabakalarının bir kısmının tribolojik zorlamalarla kırılması ve aşındırıcı parçacıkların oluşması, aşınmayı artırır. Triboksidasyon aşınması, özellikle metalik malzeme yüzeyinde görülür. Sonuçta malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur. Bu da, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine neden olur.

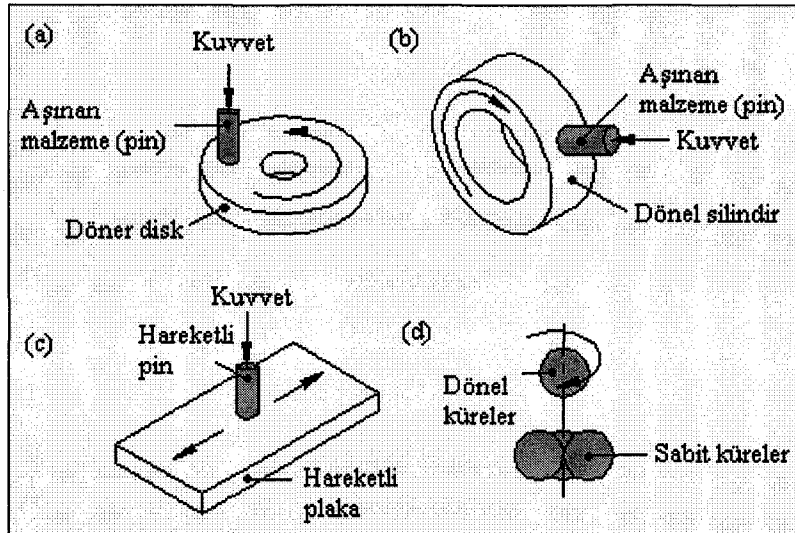
5.6. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri

5.6.1. Aşınma Deneyleri

Makine elemanlarında aranan özelliklerden bir tanesi kullanım ömürleridir. Makine parçalarının çabuk aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyeti arttırdığı gibi, onarım için geçen süre de 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 şekle 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 mevcuttur (Korkut, 1997).

Malzeme kaybı olarak tanımlanan aşınmanın ölçümü, temas eden parçalardan birinde veya her ikisinde hacim ve ağırlık kaybı esas alınarak yapılır (Kayalı ve diğ., 1997).

Sürtünme, aşınma ve yağlamanın bir karakterizasyonunu veren birkaç teknik vardır. Tribolojik davranışların çalışılmasında basit geometrik kavramlar kullanılır. Bunlar; pin-on-disk testi, blok-on-disk testi, çok yönlü (unidirectional) test ve hareketli tabaka üzerinde hareketli pin testi olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 5.7: Aşınma türlerinin şematik resimleri

Sürtünme, bir enerji kaybı yöntemidir. Bu yüzden uygulanan yükün sürtünme bileşeni kuvvet sensörleri ile ölçülür. Aşınma deneylerinden elde edilecek bilgiler;

1. Kullanılan donanım (temas geometrisi),
2. Aşınan pin ve aşındıran diskin ölçüleri,
3. Temas eden en az iki malzeme,
4. Yüzey durumu,
5. Uygulanan normal kuvvet, F_n ,
6. Uygulanan basınç, P_a ,
7. Kayma mesafesi,
8. Zaman, t ,
9. Hız, V ,
10. Test sıcaklığı, T ,
11. Atmosfer,
12. Yağlayıcı,
13. Test sayısı.

5.6.1.1. Ağırlık Farkı Yöntemi

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/cm^2) gibi bir birim kullanılabilir. Ağırlık kaybı hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybindan hareketle kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığı hesaba katılmak suretiyle, birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybindan gidilerek bulunabilir (Korkut, 1997).

Bu tanımlara göre, en çok kullanılan ağırlık farkı ölçme metodunda kullanılan bağıntı şudur;

$$W_a = \Delta m / M.s.p \quad (1)$$

Burada;

$$W_a = \text{Aşınma oranı (mm}^3/\text{N.m)},$$

$$\Delta m = \text{Ağırlık kaybı (gr)},$$

$$M = \text{Yükleme ağırlığı (N)},$$

$$s = \text{Aşınma yolu (m)},$$

ρ = Yoğunluk (gr/cm^3).

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

$$W_r = 1 / W_a \text{ (N.m/mm}^3\text{)} \quad (2)$$

Başka bir bağıntı olarak da, bir km'lik kayma yoluna karşılık gelen yükseklik kaybı bağıntısı vardır ki, genellikle iki elemanlı abrasiv aşınmanın hesaplanmasında kullanılır;

$$V_s = 10^4 \Delta m / F \cdot \rho \cdot s \text{ (}\mu\text{m/km)} \quad (3)$$

Burada;

V_s = 1 km aşınma yoluna karşılık gelen yükseklik kaybı (μm),

Δm = Ağırlık kaybı (gr),

F = Aşınma yüzeyi (cm^2),

ρ = Yoğunluk (gr/cm^3),

s = Kayma yolu (km),

olarak alınır. Deney malzemesi yükseklik kaybının, karşılaştırma malzemesi yükseklik kaybına oranı, aşınma orantısı sayısını (W_g) verir.

$$W_s = V_{\text{SNUMUNE}} / V_s \quad (4)$$

Bu orantı sayısının ters değeri ise, bağıl aşınma direnci (R) olarak tanımlanır.

$$R = 1 / W_s \quad (5)$$

Üç elemanlı abrasiv aşınmada ise, genellikle DIN 50320'de verilen boyutsuz aşınma oranı formülü yaygın olarak kullanılır.

5.6.1.2. Kalınlık Farkı Yöntemi

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

5.6.1.3. İz Değişimi Yöntemi

Sürtünme yüzeyinde, plastik deformasyon yoluyla geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deney boyunca, bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas pramit veya bilyanın bıraktığı iz boyutlarındaki değişim, mikroskop yardımıyla ölçülerek belirlenir (Korkut, 1997).

5.6.1.4. Radyo İzotop Yöntemi

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü α parçacıklarıyla bombardıman edilerek radyo aktif hale getirilmesi esasına dayanır.

Aşınmanın büyük hassasiyetle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi avantajlı yönleridir. Fakat ekonomik olmaması nedeniyle ancak özel amaçlarda kullanılır. Özel problemlerin çözümü dışında, yaygın olarak kullanılan bir yöntem değildir.

5.6.1.5. Akustik Emisyon Yöntemi

Akustik emisyon (AE), bir malzemenin şekil değiştirme enerjisinin hızla serbest kalması ile meydana gelen transient elastik gerilmesi olarak tarif edilir. Radyasyon gerilim dalgaları, uygun bir sensörle yüzeyde tespit edilir. AE verileri, pürüzlerin teması, mikro çatlakların başlaması ve gelişmesi, plastik deformasyon ve akma gibi temas yüzeylerinde meydana gelen olaylara bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir (İpek ve Karamış, 1999).

Aşınma esnasında yüzey pürüzlerinin teması sebebiyle ortaya çıkan AE r.m.s. voltajı ölçülür. Bu voltaj aşınma mekanizmasını belirler. Aşınma kaybı ile r.m.s. sinyalinin integrasyonu arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bu ifade;

$$\Delta V = K \int V_{r.m.s} dt \quad (6)$$

Burada;

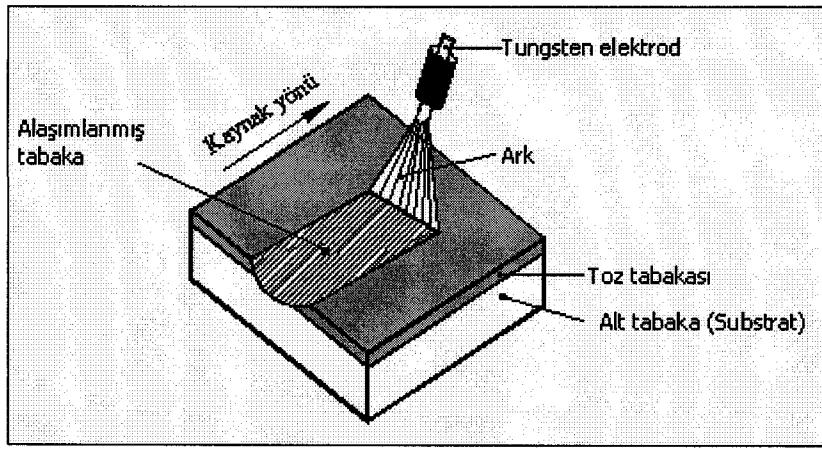
ΔV = Hacimsel ağırlık kaybı (mm^3),

K = Sabit katsayı,

$V_{r.m.s}$ = r.m.s. sinyali'dir (İpek ve Karamış, 1999).

5.6.2. Abrasif Aşınma İçin Deney Yöntemleri

Abrasif aşınma için bir çok deney yöntem ve ortamları vardır. Abrasif aşınma için kullanılan en yaygın labratuvar test yöntemleri şu iki esasa göre yapılır: Birincisi; sabitleştirilmiş bir abrasif malzeme üzerinde pim şeklinde hazırlanmış numunenin kayması; ikincisi ise, dönen bir tekerlek ve ona temas halinde kayan düz bir numune arasına serbest abrasif partiküllerin sürekli olarak dökülmesidir.



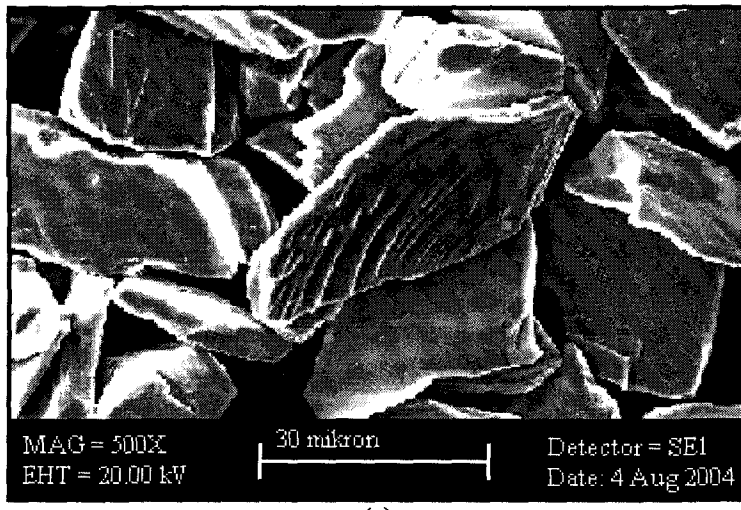
Şekil 6.2: GTA kaynak yöntemi ile yüzey alaşımlama işleminin şematik resmi

Yüzey alaşımlama için gaz tungsten ark (GTA) yönteminde DC akımlı güç kaynağından yararlanılmış olup, ark 2.4 mm çapında % 2 toryumlu tungsten elektrot ile, 10 lt/dak.'lık debiye sahip asal argon gazı altında ve 22.8-60.3 kJ/cm enerji girdisi oluşturularak; malzeme yüzeyinde 2-4.5 mm derinliğinde modifikasyona uğrayan nüfuziyetli bölge elde edilmiştir. Tablo 6.2'de üretim parametreleri, Tablo 6.3'de de deney şartları verilmiştir.

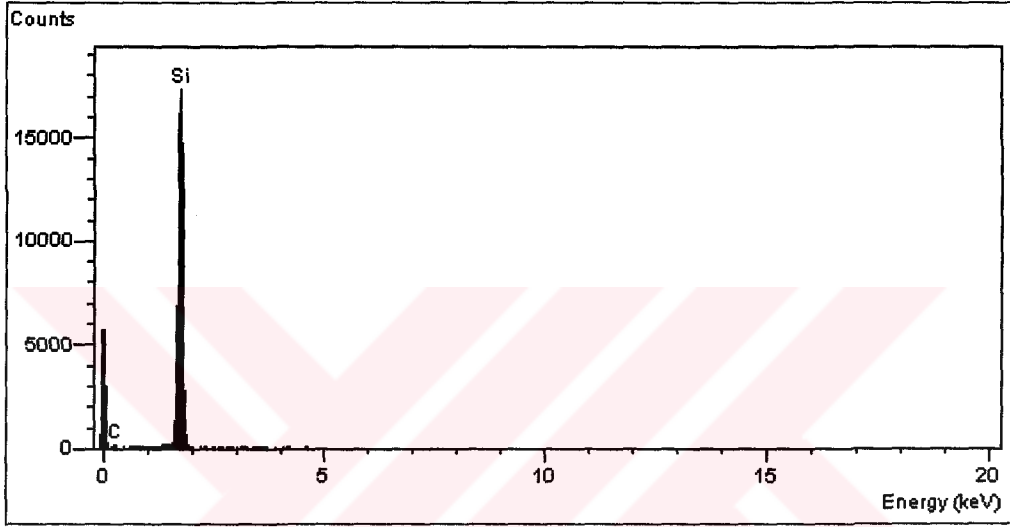
Tablo 6.2: Yüzey alaşımlama(modifikasyonu) için üretim parametreleri

Akım/Volt	130-160 A/20 V
Üretim hızı	0.28-0.82 mm/sn
Koruyucu gaz	% 99.9 saflıkta argon
Koruyucu gaz debisi	10 lt/dak.
Elektrod	% 2 toryumlu W-elektrod
Elektrod çapı	2.4 mm

Şekil 6.2'de de görüldüğü gibi GTA kaynak yöntemiyle yüzey modifikasyonunda, yüzeye yapıştırılan tozların, ergimeyen tungsten elektrot ile kaynak bölgesine enerji aktararak çelik alt tabakasına nüfuziyeti sağlanmıştır. Bu işlemde ergimiş halde bulunan toz karışımının uygun torç hareketiyle kaynak bölgesinde hapsedilmesine dikkat edilmiştir. Yüzey alaşımlama işleminden sonra numuneler su ortamında hızlıca soğutulmuştur. Thawari ve arkadaşları da (2003) aynı prensibi izlemişlerdir. Yüzey alaşımlama sonrası farklı üretim parametreleri kullanılarak elde edilen kaplama tabakasının üstten görünüşü Şekil 6.5'de gösterilmektedir.



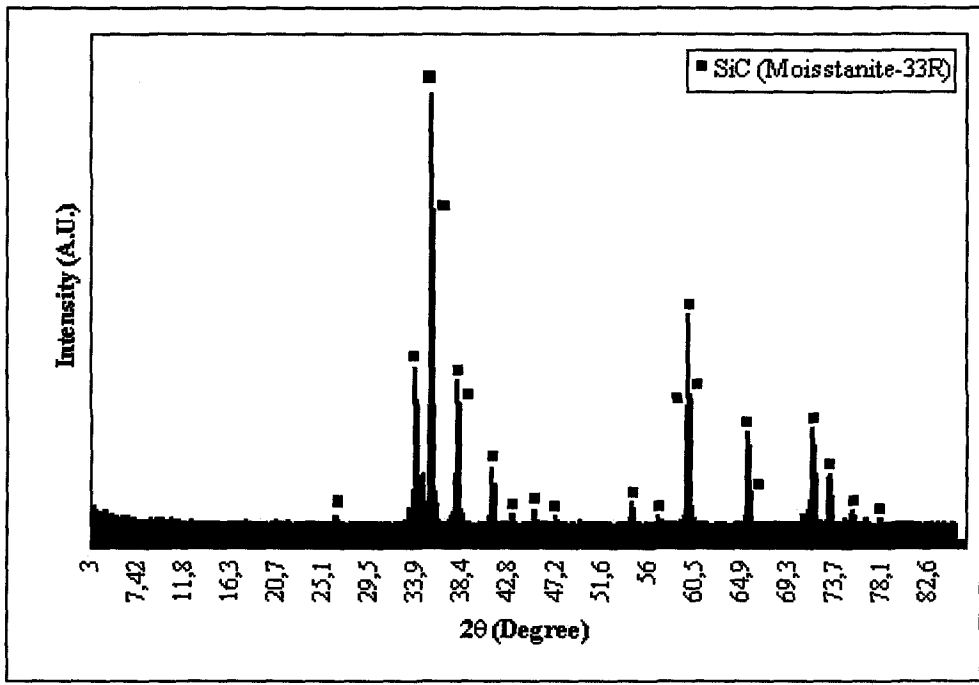
(a)



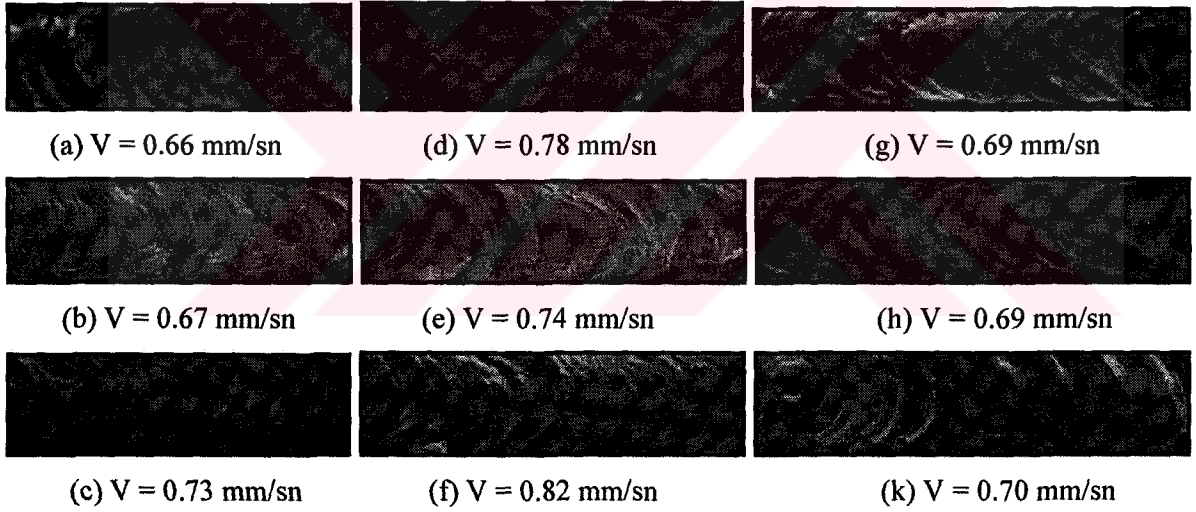
Element tipi	Yoğunluk oranı	% Standart oranı	% Ağırlık oranı	% Sigma	% Atom oranı
C	0.137	1.46	27.65	0.86	47.19
Si	1.188	1.04	72.35	0.86	52.81
Toplam			100.00		100.00

(b)

Şekil 6.3: (a) SiC tozunun morfolojisi, (b) SiC tanesi üzerinden alınan EDS analiz sonucu



Şekil 6.4: SiC kaplama tozunun XRD analiz sonucu



Şekil 6.5: GTA yöntemiyle yüzey alaşımlama yapılan 45Mn5 çeliğinin farklı üretim hızlarındaki üst yüzey görüntüleri

GTA yöntemiyle elde edilen yüzey alaşımlı numunelerin, mikro kimyasını ve mikro yapıya üretim parametrelerinin etkisini incelemek için üretim hızı (V) 0.28-0.82 mm/sn, toz miktarı 0.5-2.5 gr. ve akım değeri ise 130-160 A arasında değiştirilmiştir. Yüzeyi alaşımlanan numunelerde, yüzeyi olumsuz atmosferden korumak için 10 lt/dak. debiye sahip saf argon gazı kullanılmıştır.

Tablo 6.3: Üretim parametrelerinin sertliğe ve ıslatılabilirliğe etkisi

Üretim Parametreleri						Etkilen Özellikler	
Numune No.	Elektrod çapı (mm)	Akım Şiddeti (A)	Üretim Hızı (mm/sn)	Katılan Toz Miktarı (gr)	•Enerji Girdisi (kJ/cm)	♦Islatılabilirlik oranı (%)	Makro-sertlik (HV ₃)
0	-	-	-	-	-	-	250±12
1	2.4	130	0.66	1	25.6	6.00	760±15
2	2.4	130	0.48	2	42.2	5.40	762±12
3	2.4	130	0.39	1.5	43.3	3.30	698±34
4	2.4	130	0.28	2.5	60.3	8.75	830±14
5	2.4	140	0.78	1	23.3	8.45	873±26
6	2.4	140	0.53	2	34.3	5.70	790±31
7	2.4	140	0.69	1.5	26.3	3.75	731±27
8	2.4	140	0.44	2.5	41.3	9.75	1246±46
9	2.4	150	0.59	1	33.0	3.75	632±17
10	2.4	150	0.47	2	41.4	4.20	728±15
11	2.4	150	0.58	1.5	33.6	4.00	983±35
12	2.4	150	0.67	2.5	29.1	11.25	995±22
13	2.4	130	0.74	0.5	22.8	6.00	571±11
14	2.4	140	0.73	0.5	24.9	6.00	547±14
15	2.4	150	0.69	0.5	28.2	3.50	514±15
16	2.4	160	0.82	0.5	25.3	5.00	508±22
17	2.4	160	0.70	1	29.7	4.50	643±18
18	2.4	160	0.69	1.5	30.1	4.25	720±33

•Enerji girdisi = ηUI (60/1000V); U: gerilim, I: akım, V: üretim hızı, η : verimlilik katsayısı (GTA için 0.65); (Lin ve diğ., 2003)

♦Islatılabilirlik oranı = $100A/A+B$; A, B: Alaşım bölgenin ölçüleri

6.3. Mikroyapı İncelemeleri ve Sertlik Ölçümleri

Metalografik incelemeler için numuneler, kaynak yönüne dik bir şekilde alaşım bölgeden alınmıştır. Elde edilen metalografi numuneleri 80-1200 mesh'lik zımpara kağıdına tutularak yüzeyleri temizlenmiştir. Daha sonra 1 ve 6 μm 'lik elmas pasta ve inceltici yardımıyla yan kesit yüzeyleri parlatılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için modifikasyonlu numuneler 5-10 saniye süreyle 5 gr. FeCl₃, 25 gr. HCl ve 100 ml H₂O çözeltisinde dağlanmıştır. Alaşımlanan yüzeyden mikroyapı element analizi için optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dispersive spektograph

7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

7.1. Mikroyapı İnceleme Sonuçları

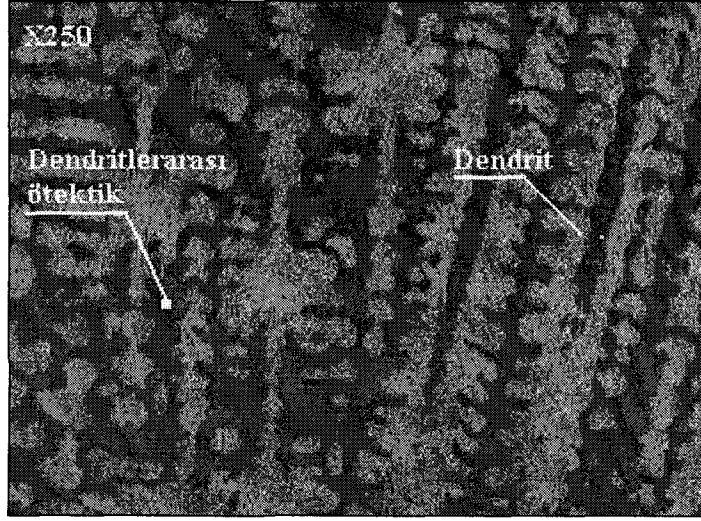
Bu çalışmada; 45Mn5 çeliğinin GTA yöntemi kullanılarak SiC ile yüzey modifikasyonu işleminde; mikroyapı, mikrosertlik, makrosertlik ve abrasif aşınma değişkenlerine üretim parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Üretim parametrelerinden üretim hızı, enerji girdisi ve katılan toz miktarı; mikroyapı değişimi üzerine önemli bir paya sahiptir. Enerji girdisi, katılma hızı üzerinde etkili olmaktadır. Yüzeyde gerçekleşen farklı miktarlarda SiC modifikasyonu sonrası yüzeyin 0.5 mm altından alınan spektral analiz verileri Tablo 7.1’de verilmiştir. Bunun yanında, 45Mn5 çeliğinin yüzeyine yapılan modifikasyon işlemi sonrası makro ve mikroyapı incelemeleri sonucunda bazı numunelerde, modifiye edilen bölge boyunca bazı dikey çatlaklara da rastlanılmıştır. Bunun sebebi; muhtemelen yüksek ısı kalıntı gerilmelerin varlığı, çeliğe göre demir oksit düşük ısı genleşme katsayısı ve gevrek oksit fazlarının varlığıdır (Thawari ve diğ., 2003).

Tablo 7.1: SiC tozuyla yüzey modifikasyonu yapılan numunelerin yüzeylerinden alınan spektral analiz sonuçları.

Numune no.	% Alaşım elementi miktarı								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Fe
0	0.460	0.360	1.290	0.025	0.064	0.006	0.017	0.016	Kalan
1	2.640	3.890	1.140	0.017	0.050	0.004	0.022	0.020	Kalan
2	3.430	4.120	1.190	0.014	0.053	0.005	0.023	0.020	Kalan
3	2.800	4.320	1.060	0.011	0.047	0.005	0.020	0.021	Kalan
4	1.770	4.150	1.110	0.013	0.045	0.005	0.020	0.020	Kalan
5	2.330	3.360	1.170	0.013	0.051	0.004	0.027	0.027	Kalan
6	3.150	4.100	1.160	0.015	0.055	0.001	0.030	0.025	Kalan
7	2.500	3.740	1.100	0.011	0.044	0.005	0.022	0.019	Kalan
8	1.750	3.500	1.100	0.013	0.046	0.003	0.019	0.020	Kalan
9	3.150	4.150	1.180	0.015	0.049	0.005	0.021	0.020	Kalan
10	3.600	4.320	1.100	0.013	0.023	0.008	0.026	0.030	Kalan
11	2.720	3.880	1.190	0.017	0.052	0.003	0.022	0.022	Kalan
12	1.700	3.290	1.200	0.017	0.054	0.004	0.023	0.018	Kalan
13	1.650	2.350	1.170	0.011	0.053	0.003	0.027	0.023	Kalan
14	1.650	2.400	1.280	0.020	0.062	0.001	0.020	0.020	Kalan
15	1.380	2.530	1.150	0.016	0.047	0.006	0.020	0.013	Kalan
16	1.600	2.150	1.120	0.019	0.040	0.005	0.022	0.021	Kalan
17	2.520	3.650	1.120	0.012	0.044	0.004	0.025	0.020	Kalan
18	2.590	3.650	1.140	0.015	0.046	0.005	0.023	0.022	Kalan

GTA yöntemiyle üretilen yüzey modifikasyonlu numunelerin mikro kimyasını ve mikroyapıya üretim parametrelerinin etkisini incelemek için üretim hızı 0.28 mmsn^{-1} ’den 0.82 mmsn^{-1} ’ye ve katılan toz miktarı 0.5 gr’dan 2.5 gr’a kadar değiştirilmiştir.

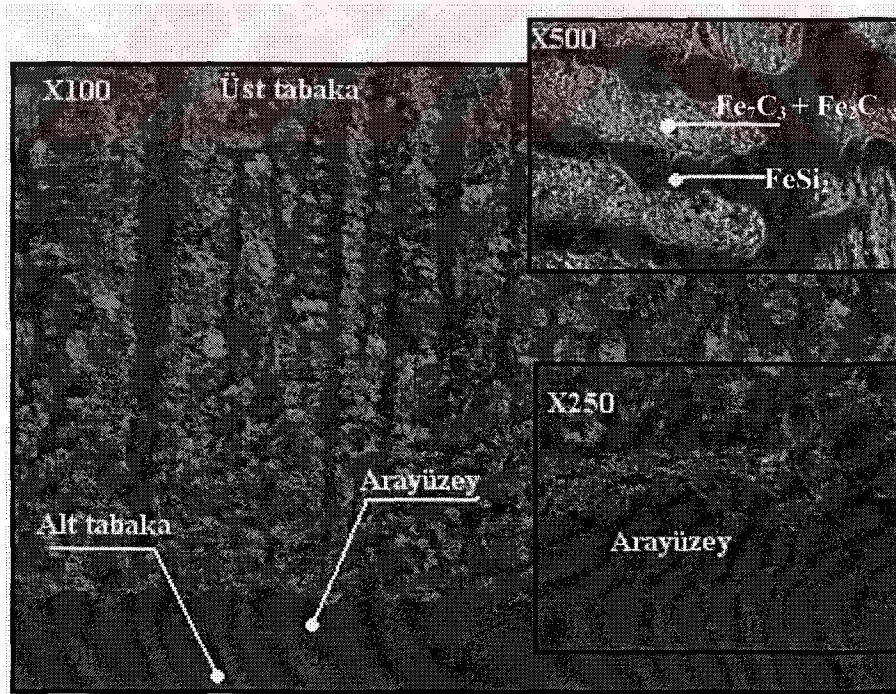
Şekil 7.1’de 0.39 mmsn^{-1} üretim hızında 1.5 gr toz ilave değerinde 43.3 kJ/cm enerji girdisi ile üretilen 3 nolu numunenin SiC alaşım tozuyla üretilen modifikasyonlu üst tabaka malzemesinin mikroyapısı verilmiştir.



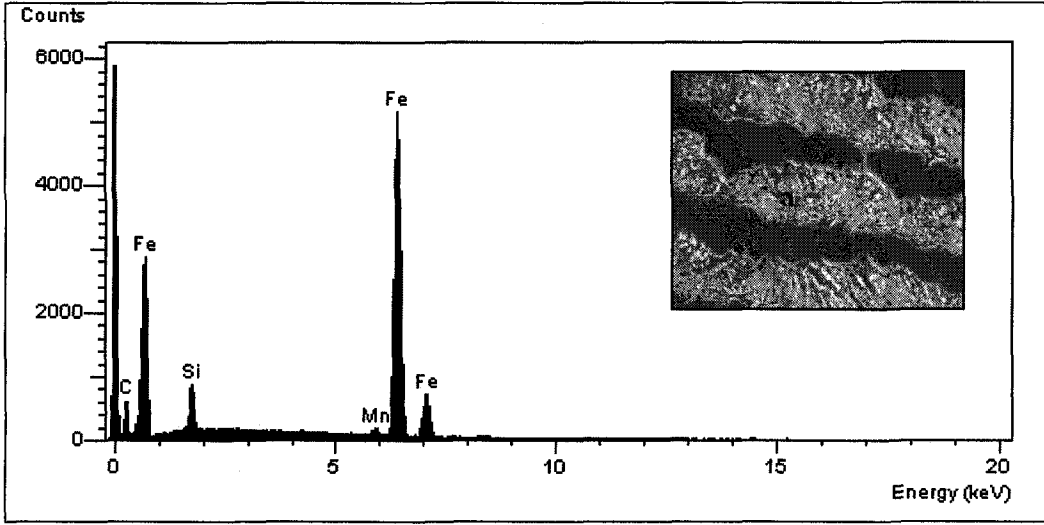
Şekil 7.1: GTA yöntemiyle üretilen 3 nolu numunenin SEM görünümü (X250).

Şekil 7.1'den de görüldüğü gibi SiC ile alaşımlanmış bölge Si, C ve Fe bakımından zengindir. Buradan kaplama tozu ile alt malzemenin homojen bir şekilde katılaştığı anlaşılmaktadır. Şekil 7.2'de de 3 nolu numunenin üst tabaka, arayüzey ve alt tabaka bölgeleri görülmektedir.

Modifikasyon bölgesindeki dendrit ve matris bölgelerinden alınan EDS sonuçları Şekil 7.3 ve Şekil 7.4 de görülmektedir. EDS sonuçlarına göre matris; % 4.73 Si, % 1.19 Mn ve % 94.08 Fe içeriğine sahipken, dendritik yapı ise; % 3.34 Si, % 15.37 C, % 1.46 Mn ve % 79.64 Fe alaşım oranına sahip ötektik üstü yapıdan oluşmaktadır.

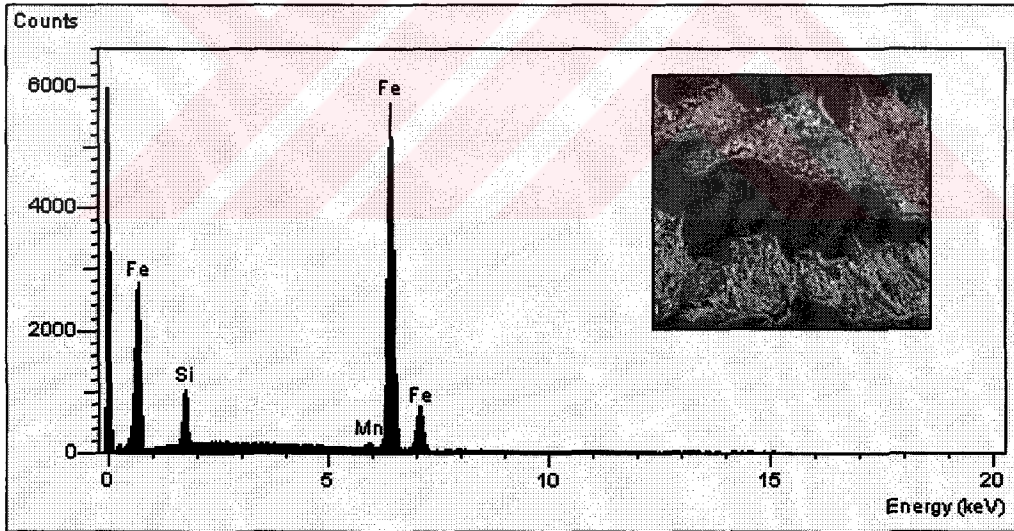


Şekil 7.2: GTA ile modifiye edilmiş 3 nolu numunenin üst tabaka, arayüzey ve alt tabakanın SEM fotoğrafı



Element tipi	Yoğunluk oranı	% Standart oranı	% Ağırlık oranı	% Sigma	% Atom oranı
C	0.521	1.46	15.37	0.35	45.20
Si	0.767	1.04	3.34	0.09	4.15
Mn	0.949	1.00	1.46	0.15	0.93
Fe	0.969	1.00	79.64	0.37	49.73
Toplam			100.00		100.00

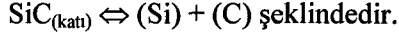
Şekil 7.3: 3 nolu numunenin matris bölgesinden (a bölgesi) alınan EDS sonucu



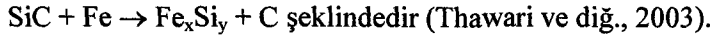
Element tipi	Yoğunluk oranı	% Standart oranı	% Ağırlık oranı	% Sigma	% Atom oranı
Si	0.749	1.04	4.73	0.11	8.98
Mn	0.968	1.00	1.19	0.15	1.16
Fe	0.989	1.00	94.08	0.18	89.86
Toplam			100.00		100

Şekil 7.4: 3 nolu numunenin dendrit bölgesinden (b bölgesi) alınan EDS sonucu

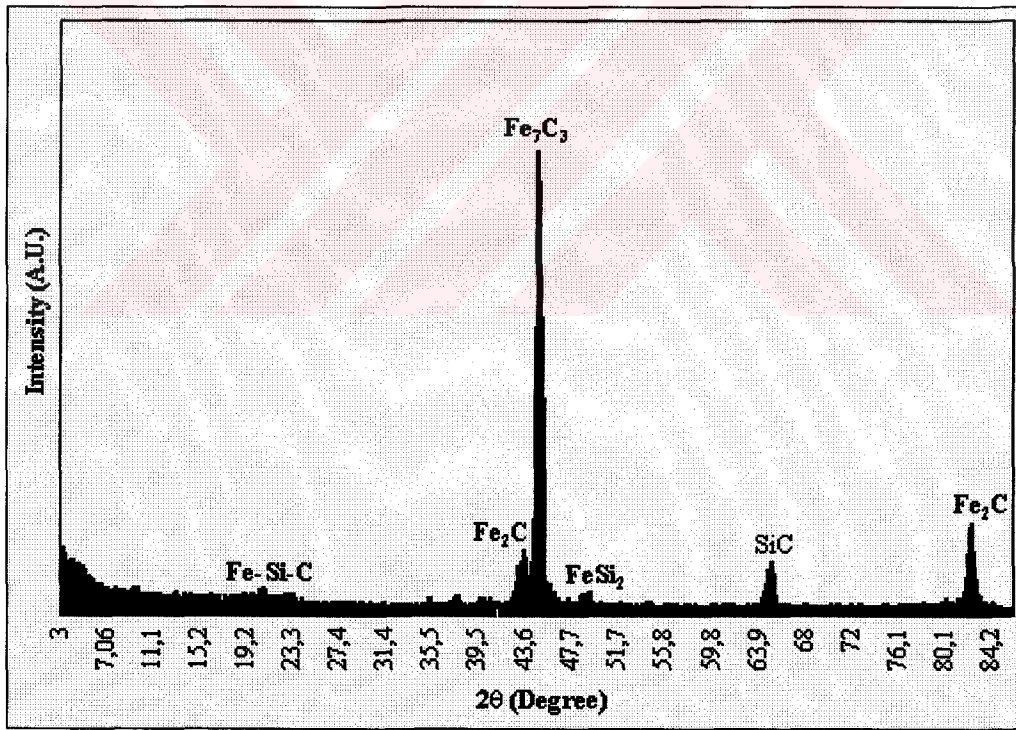
Şekil 7.2’den de görüldüğü gibi mikroyapıda, ince taneli dendrit ve ötektik üstü bir yapı oluşmuştur. Bu da; soğuma hızının artması, dolayısıyla alt soğumanın geniş aralık göstermesi ve martenzit başlama sıcaklığının düşmesiyle açıklanabilir (Buytoz, 2004; Zeng ve diğ., 2002). XRD analizlerinden de anlaşıldığı gibi kaplama bölgesinde çözünmemiş halde SiC yapısına rastlanmamıştır. Bu da SiC’ün verilen enerji girdisiyle çözündüğü ve katılaşma sırasında alt tabaka malzemesinden demiri (Fe) bünyesine alarak bileşik oluşturduğunu göstermektedir. SiC, önce bileşenlerine ayrışıp, sonra reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyon;



Yaklaşık olarak Fe ile SiC 1200 °C’de reaksiyona girer ve reaksiyon uyarınca oluşan ürünler;



XRD analizleri sonucunda 3 nolu numunede Fe_2C , FeSi_2 ve Fe_7C_3 (M_7C_3) fazları elde edilmiştir (Şekil 7.5). Elde edilen bu fazların kristal yapıları Tablo 7.2’de verilmiştir. Cheng ve diğ. (2001), SS316 paslanmaz çeliğinin yüzeyini SiC tozunu LSA yöntemini kullanarak alaşımlandırmışlar ve Fe_3Si ile M_7C_3 fazlarını elde etmişlerdir.

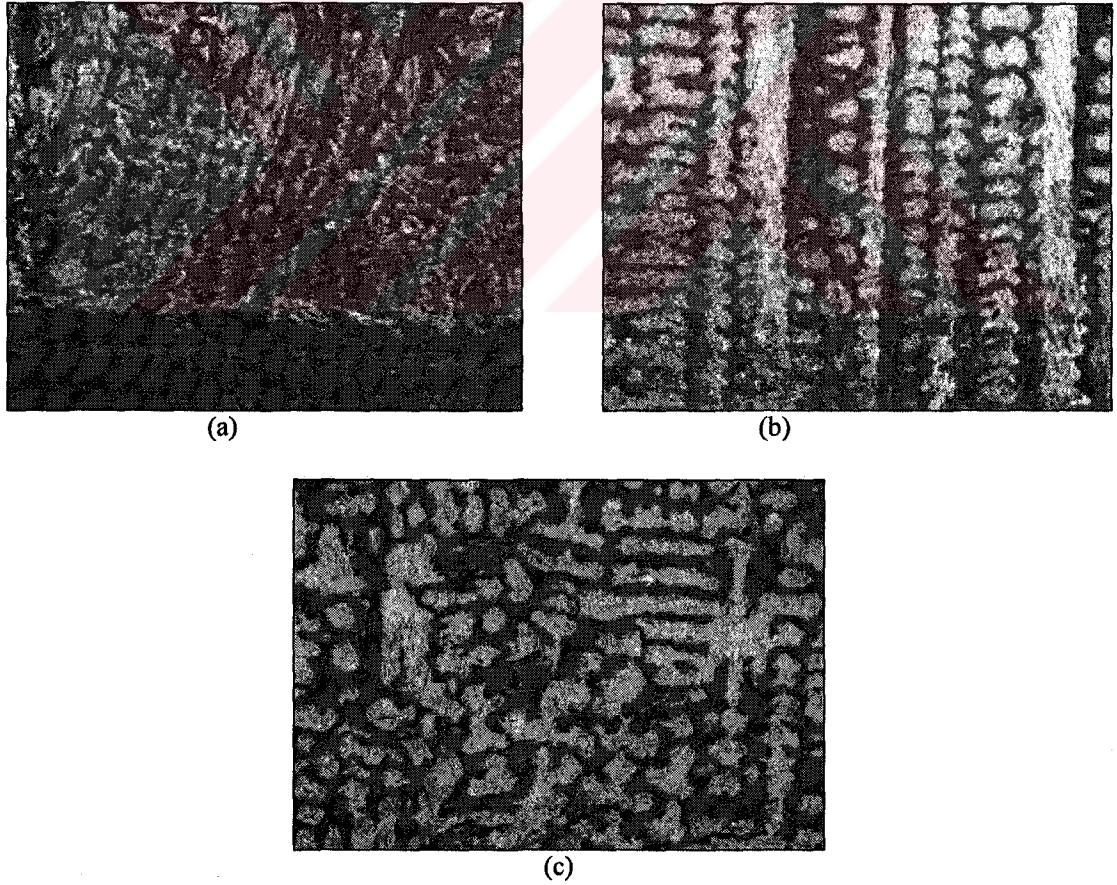


Şekil 7.5: 3 nolu numunenin XRD analiz sonucu

Tablo 7.2: 3 Nolu numunede elde edilen fazların kristal yapıları.

Faz	Kristal yapısı	Uzay grubu	Latis parametresi (Å)
Fe_7C_3	Hegzagonal	P63mc	$a = b = 6.882$ $c = 4.654$
FeSi_2	Ortorombik	R3m	$a = 9.879$ $b = 7.999$ $c = 7.839$
Fe_2C	Monoklinik	P63/mmc	$a = b = 2.794$ $c = 4.360$
SiC	Rombohedral	R3m	$a = b = 3.073$ $c = 8.294$

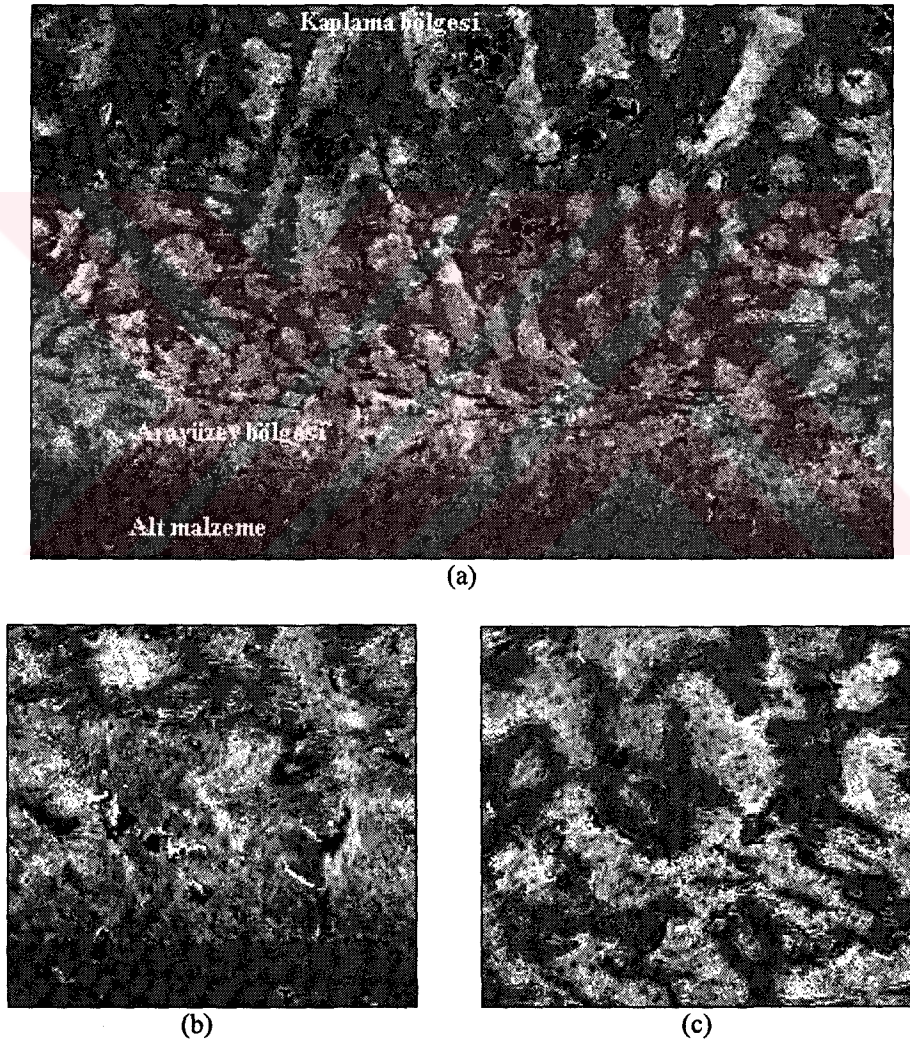
Arayüzeyden başlayarak ergiyik havuzunun merkezine doğru ısı akışına zıt yönde gözenekli ve dendritik katılaşma gözlenmiştir. Diğer yandan, arayüzeyde dendritik katılaşmanın aksine planar katılaşmaya rastlanmıştır. Bunun sebebi; arayüzeyde sıcaklık gradyanının (ΔT) yüksek ve katılaşma hızının (V) da düşük olması, dolayısıyla $\Delta T/V$ oranının yüksek olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca bu oranın düşük olduğu durumlarda da dendritik katılaşma gözlenmektedir (Li ve diğ., 2004). SiC ile yüzey alaşımlamada kaplama/alt malzeme arayüzeyinden başlayarak kaplamanın üst noktasına kadar dendritlerin yönleri ve büyüklükleri değişmektedir. Bu farklılık Şekil 7.6'da açıkça görülmektedir.



Şekil 7.6: 3 nolu numune için dendritlerin yönlerinin ve boyutunun değişimi (a) arayüzey bölgesi, (b) kaplamanın merkez bölgesi, (c) kaplamanın üst bölgesi

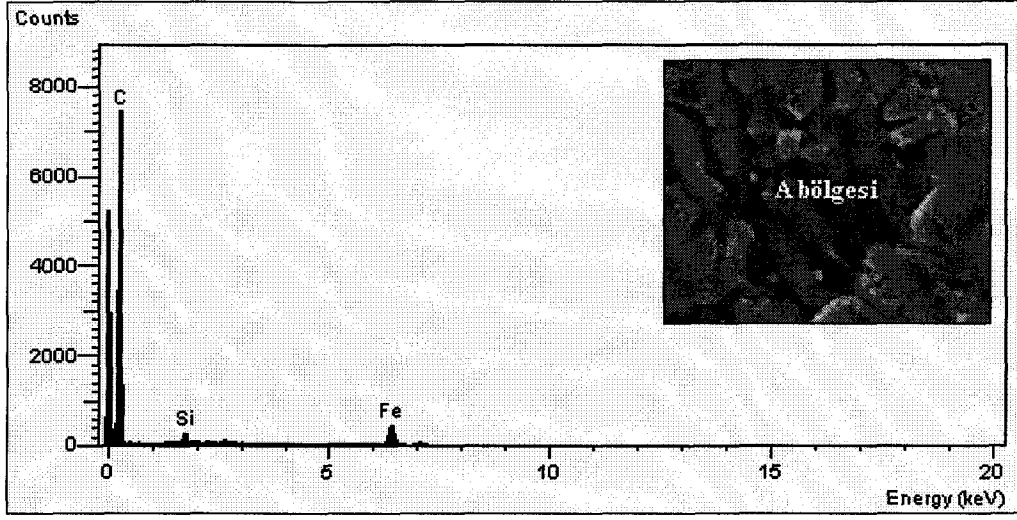
Şekil 7.6'dan da görüldüğü gibi, arayüzeye yakın bölgede taneler büyük ve yönlenmesiz bir biçimde (Şekil 7.6a), kaplamanın merkez bölgesinde dendritler arayüzey ile dik açı oluşturacak şekilde yönlenmiştir ve boyutları da arayüzeye göre biraz daha küçüktür (Şekil 7.6b). Kaplamanın üst kısmında ise taneler küçük olup çeşitli yönlerde yönlenmektedir (Şekil 7.6c). Bu farklılığın sebebi, kaplamanın üst kısmında soğuma hızının maksimum seviyede olması ve arayüzey bölgeye doğru azalmasıdır. Üst kısımda çeşitli yönlenmelerin olmasının sebebi ise, GTA torcunun hareketinin çeşitliliği ve koruyucu atmosferdir. Çünkü koruyucu atmosfer ergiyik havuzundan Marangoni ekisiyle ısının akışını sağlamaktadır. Merkez bölgede dendritlerin üst kısma doğru yönlenmesinin sebebi de, ısı akışının alt malzemeye doğru olmasıdır (Thawari ve diğ., 2003; Zeng ve diğ., 2002).

3 nolu numuneye göre daha düşük üretim hızında (0.28 mmsn^{-1}), daha yüksek enerji girdisi (60.3 kJ/cm) ve ve toz ilavesinde (2.5 gr) modifiye olan 4 nolu numunenin mikroyapı fotoğrafları Şekil 7.7'de görülmektedir.



Şekil 7.7: 4 nolu numunenin mikroyapı fotoğrafları (a) alt malzeme, arayüzey ve kaplama bölgesi (X100), (b) arayüzey bölgesi (X250), (c) kaplama bölgesi (X250).

4 nolu numunede enerji girdisi, 3 nolu numuneye göre daha fazla olduğundan arayüzey bölgesi daha kalındır. 3 nolu numunede 28 μm iken, 4 nolu numunede bu değer 46 μm 'dir. Ayrıca artan enerji girdisi ile dendritlerin büyüklüğünde de artma olmaktadır. 4 nolu numunede dallı kıvrılcım şeklinde grafitler oluşmuş olup EDS analiz sonucu Şekil 7.8'de verilmiştir.



Element tipi	Yoğunluk oranı	% Standart oranı	% Ağırlık oranı	% Sigma	% Atom oranı
C	1.469	1.46	88.51	0.28	97.05
Si	1.076	1.04	1.03	0.05	0.48
Fe	0.888	1.00	10.46	0.27	2.47
Toplam			100.00		100.00

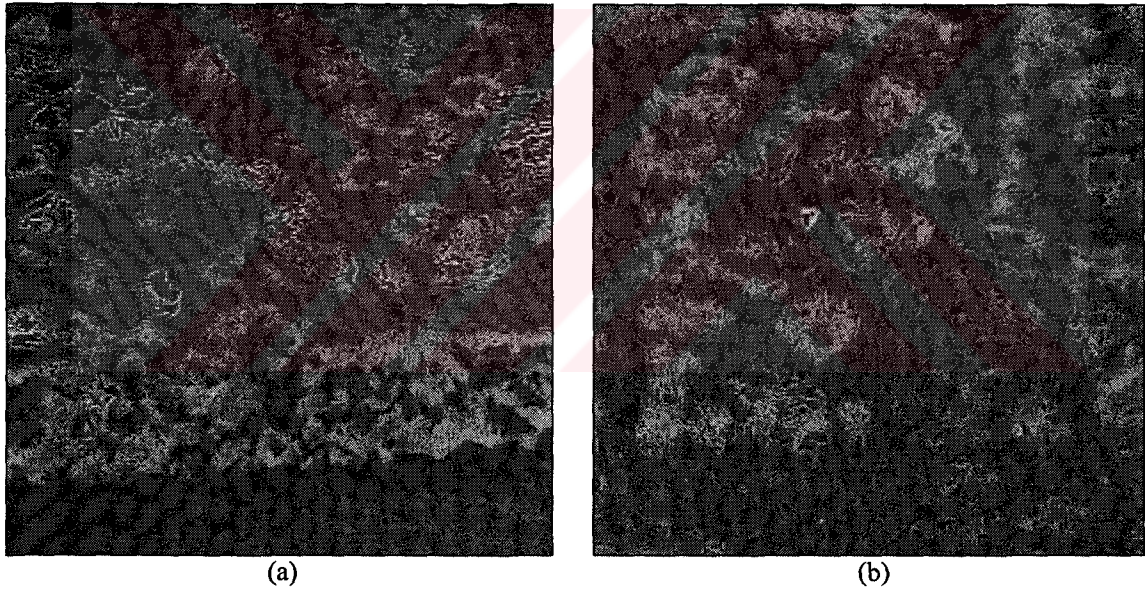
Şekil 7.8: 4 nolu numunede "A" noktasının EDS analiz sonucu



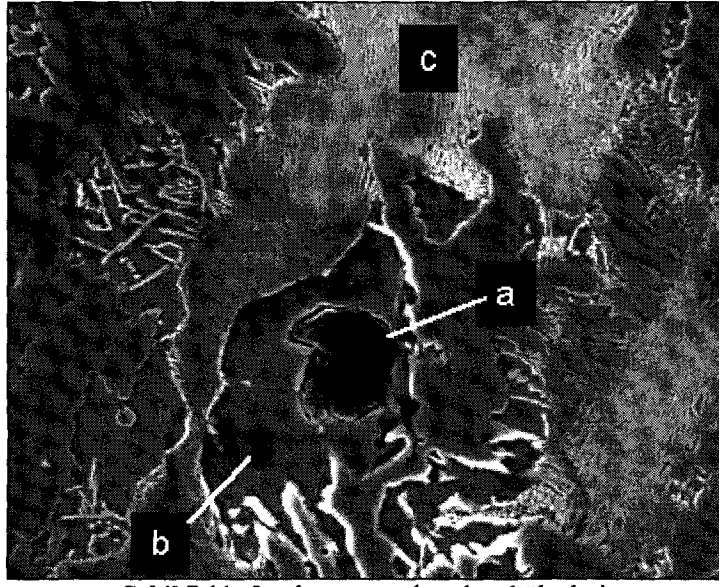
Şekil 7.9: 5 nolu numunenin optik fotoğrafı (X100).

3, 4 ve 5 nolu numuneler dendritlerin büyüklüğü açısından karşılaştırıldığında en küçük dendrit yapısına 3 nolu numunenin, en büyüğünün ise 4 nolu numuneye ait olduğu Şekil 7.2, Şekil 7.7 ve Şekil 7.9'da açıkça görülmektedir. Çünkü en fazla enerji girdisine 4 nolu numune sahiptir. Fazla enerji girdisiyle enerjinin büyük bir kısmı ertitmeye ve daha çok SiC'ün çözünmesine harcadığından, düşük soğuma hızı oluşur ve yapı da buna bağlı olarak kaba dendritlerden meydana gelir. Ayrıca 3 nolu numune, Tablo 7.1'de de görüldüğü gibi, karbon ve silisyum elementleri açısından 4 ve 5 nolu numunelere göre daha zengin olduğundan; katılaşma esnasında daha çok çekirdek görevi üstlenen SiC karbür taneciklerinin oluşması ile, dendritler daha ince taneli olarak ortaya çıkmıştır.

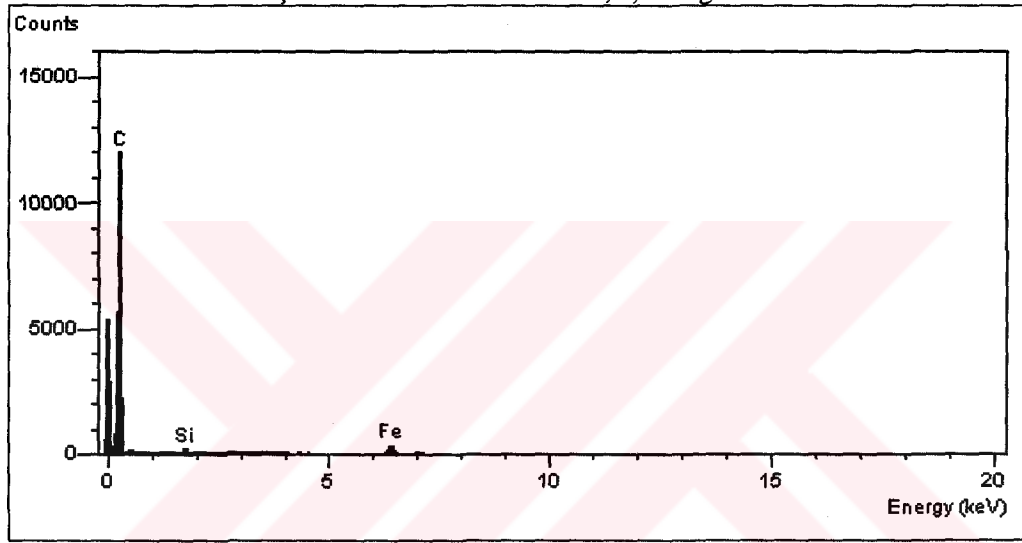
Şekil 7.7'de görüldüğü gibi, numunelerin arayüzeye yakın bölgelerinde grafit çökmesi gözlenmektedir. Bu çökme, artan SiC ilavesiyle daha da yoğun hale gelmektedir. Bu durum grafitin parçalanması için gerekli olan sıcaklığın yüksek olmasından ve sıcaklığın yüksek olduğu yerlerde soğuma süresinin uzamasından ötürü arayüzeye yakın bölgelerde ortaya çıkmıştır. Arayüzey bölgeleri enerji girdisinin kaplama bölgesine göre düşük olduğu kısımlardır. Dolayısıyla bu bölgelerde soğuma hızı da düşük olur. Grafit ayrışmasının olabilmesi için silisyum içeriğinin yüksek olması gerekir. Bu da yüksek SiC ilavesi ile sağlanmaktadır.



Şekil 7.10: 5 nolu numunenin (a) arayüzey ve (b) kaplama bölgesi SEM fotoğrafları (X250)

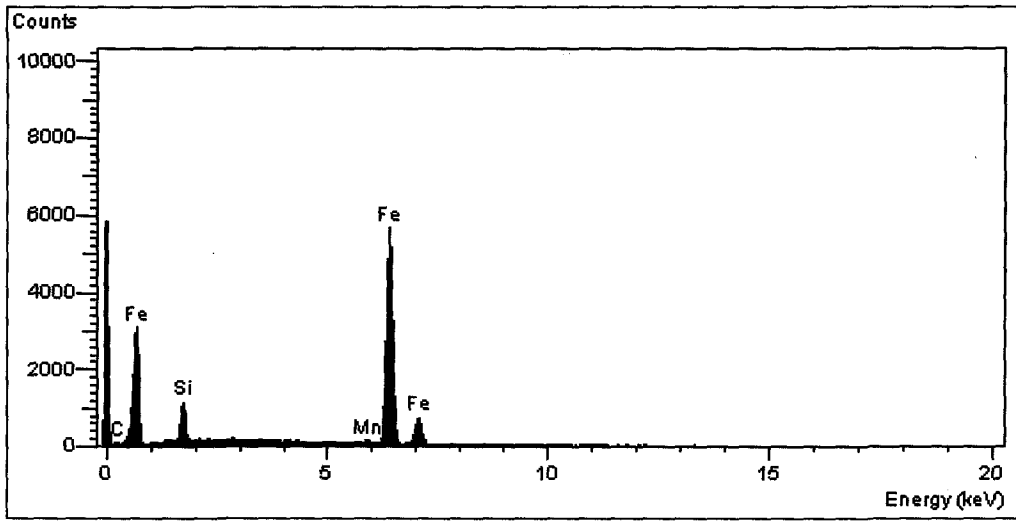


Şekil 7.11: 5 nolu numunede a, b, c bölgeleri



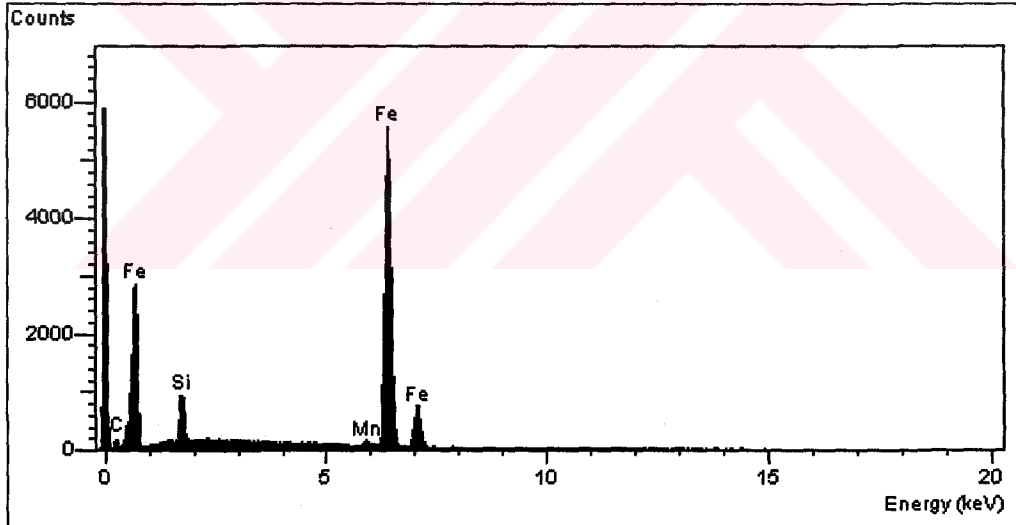
Element tipi	Yoğunluk oranı	% Standart oranı	% Ağırlık oranı	% Sigma	% Atom oranı
C	1.756	1.46	93.69	0.20	98.46
Si	1.114	1.00	0.51	0.04	0.23
Fe	0.884	1.00	5.79	0.20	1.31
Toplam			100.00		100.00

Şekil 7.12: 5 nolu numune için "a" noktasının EDS analiz sonucu



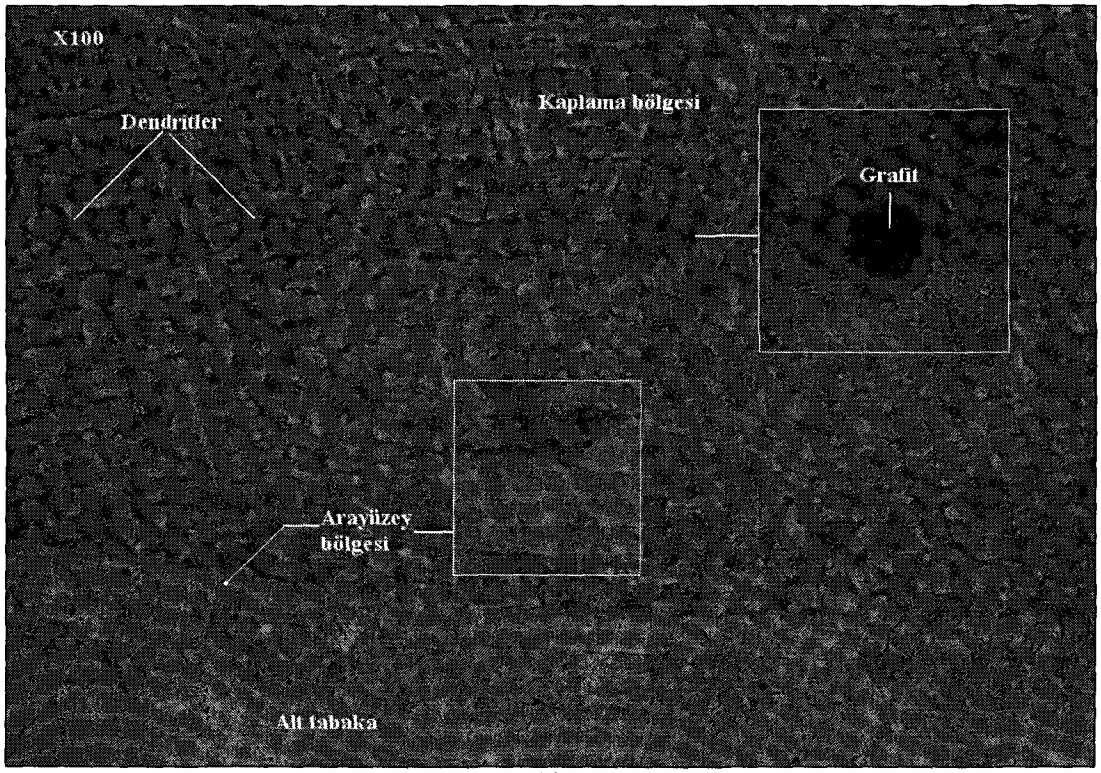
Element tipi	Yoğunluk oranı	% Standart oranı	% Ağırlık oranı	% Sigma	% Atom oranı
C	0.492	1.46	1.53	0.27	6.43
Si	0.751	1.04	5.22	0.11	9.37
Mn	0.965	1.00	0.90	0.15	0.82
Fe	0.986	1.00	92.35	0.31	83.38
Toplam			100.00		100.00

Şekil 7.13: 5 nolu numune için “b” bölgesinin EDS analiz sonucu

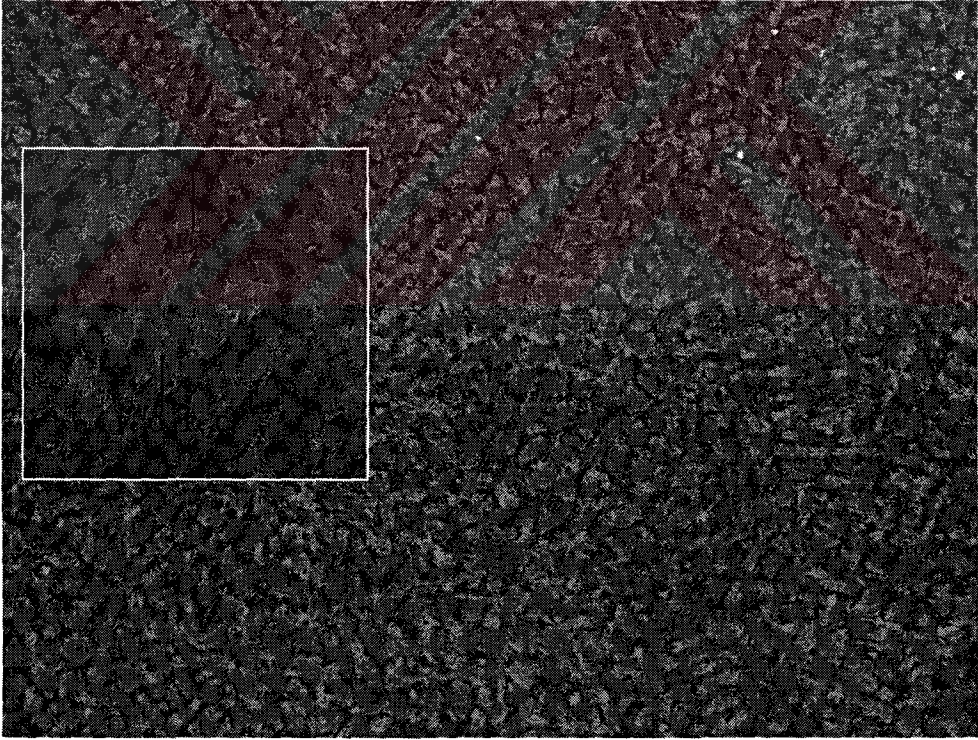


Element tipi	Yoğunluk oranı	% Standart oranı	% Ağırlık oranı	% Sigma	% Atom oranı
C	0.499	1.46	5.47	0.30	20.46
Si	0.754	1.04	4.45	0.11	7.11
Mn	0.961	1.00	0.91	0.14	0.74
Fe	0.981	1.00	89.17	0.33	71.69
Toplam			100.00		100.00

Şekil 7.14: 5 nolu numune için “c” bölgesinin EDS analiz sonucu

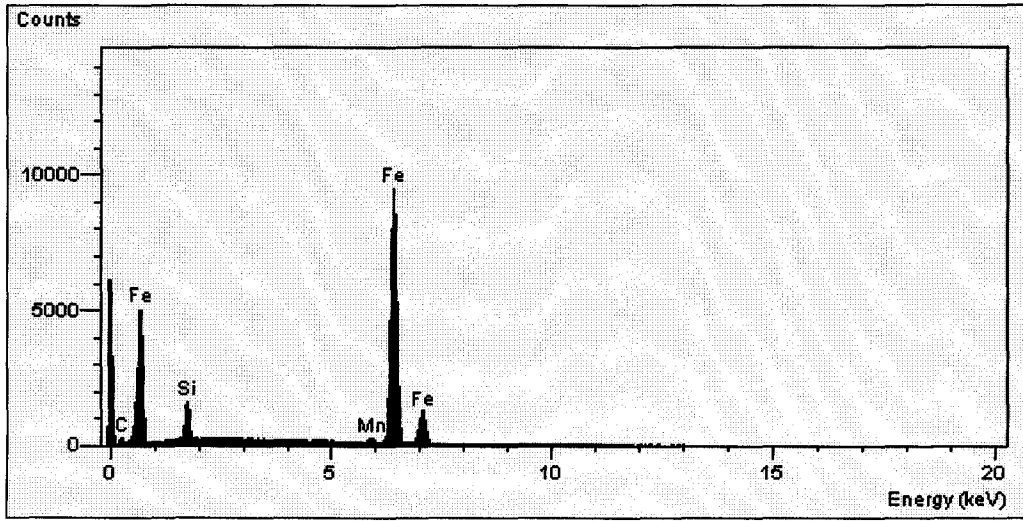


(a)



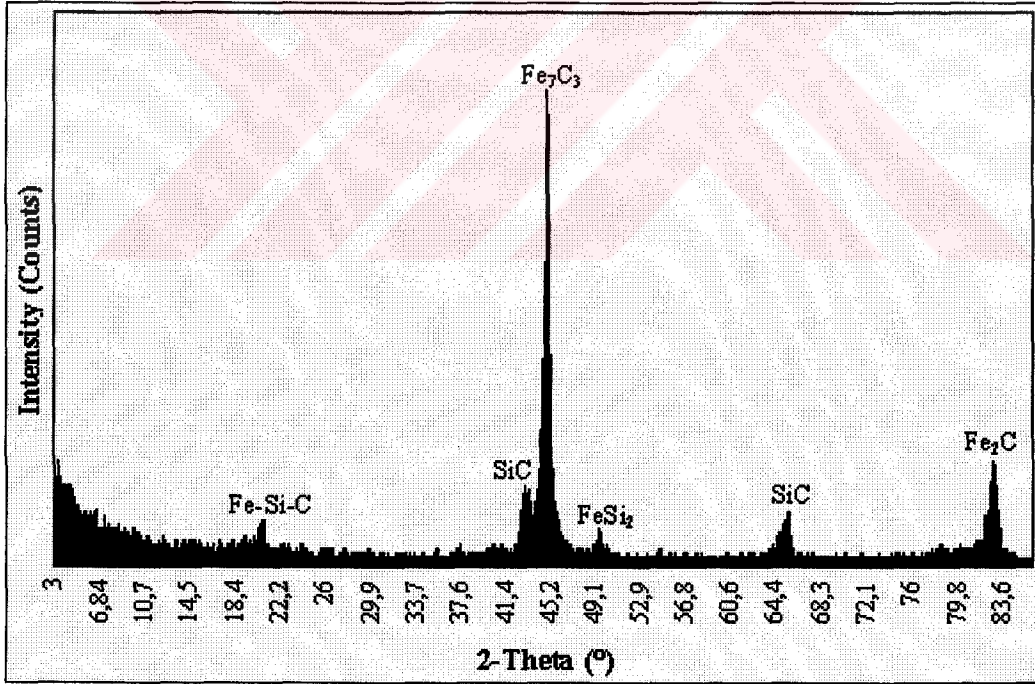
(b)

Şekil 7.15: 9 nolu numunenin (a) genel görünüm, (b) kaplama bölgesi SEM fotoğrafı (X100)



Element tipi	Yoğunluk oranı	% Standart oranı	% Ağırlık oranı	% Sigma	% Atom oranı
C	0.504	1.46	5.24	0.22	19.78
Si	0.753	1.04	4.07	0.08	6.56
Mn	0.962	1.00	1.00	0.12	1.03
Fe	0.983	1.00	89.45	0.25	72.63
Toplam			100.00		100.00

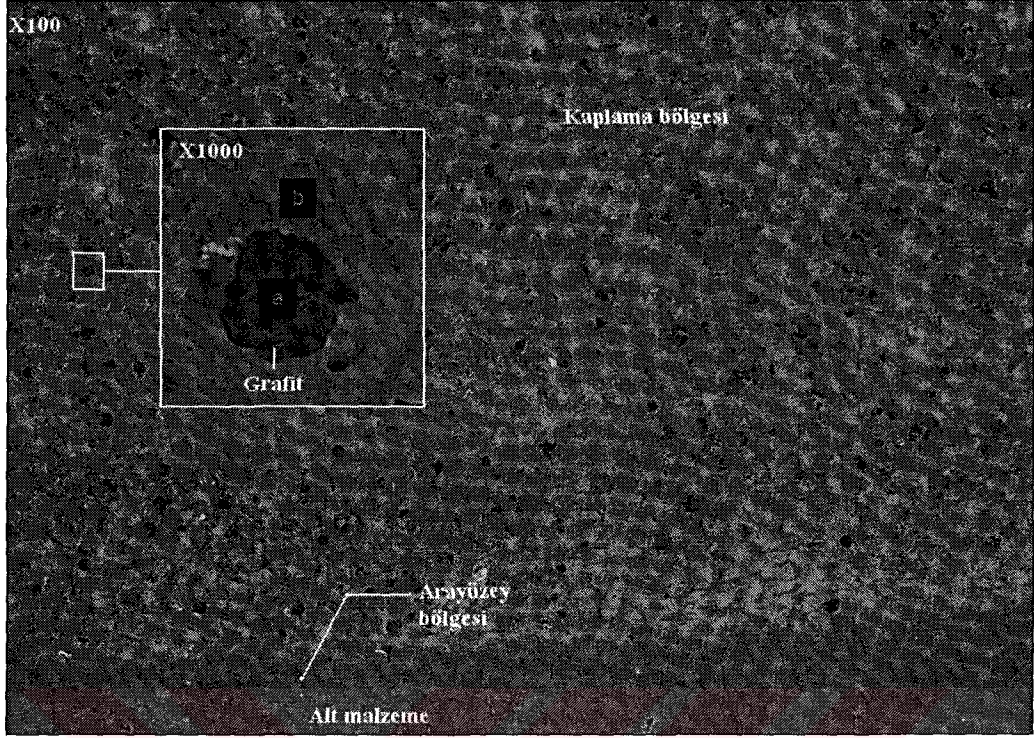
Şekil 7.16: 9 nolu numune için genel EDS analiz sonucu



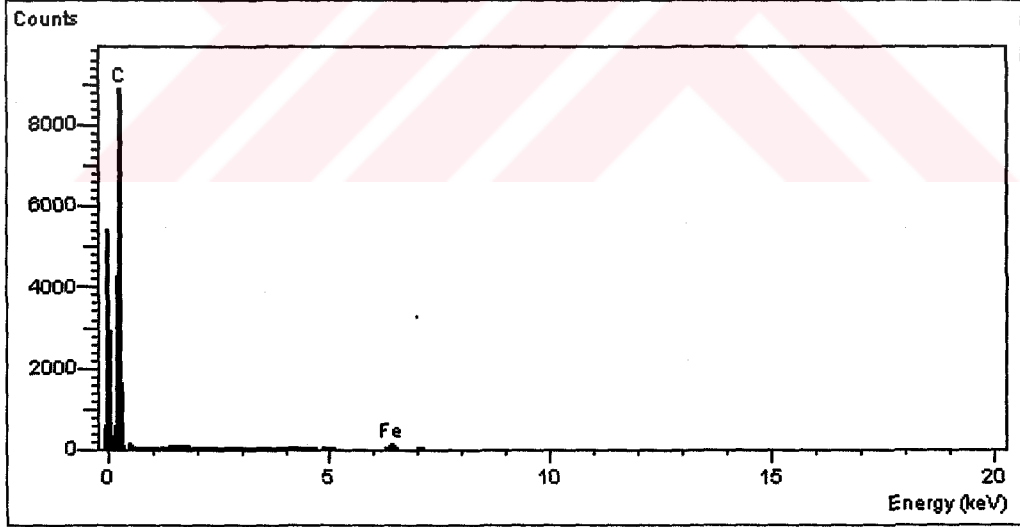
Şekil 7.17: 9 nolu numunenin XRD analizi

XRD analiz sonuçlarından da görüldüğü gibi dendrit kolları arasında FeSi_2 fazı oluşmuş dendrit yapısında ise Fe_7C_3 ve Fe_2C fazları oluşmuştur. Thawari ve ark. (2003) yaptığı çalışmada da

dendrit kolları arasında Fe ile birlikte Fe_2Si ve Fe_3Si fazları, dendritler üzerinde de C'ca zengin Fe_7C_3 fazı tespit edilmiştir.

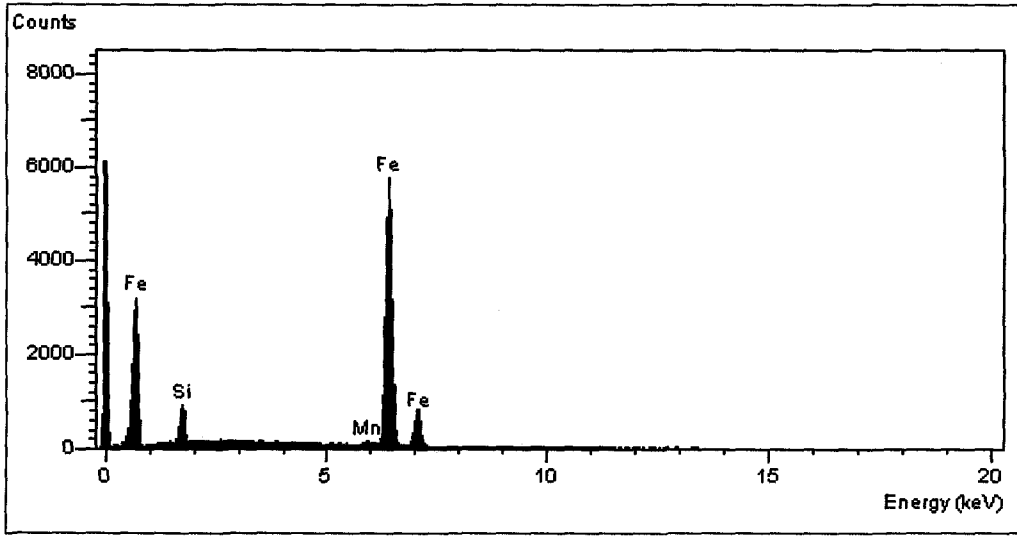


Şekil 7.18: 11 nolu numunenin genel SEM fotoğrafı (X100)



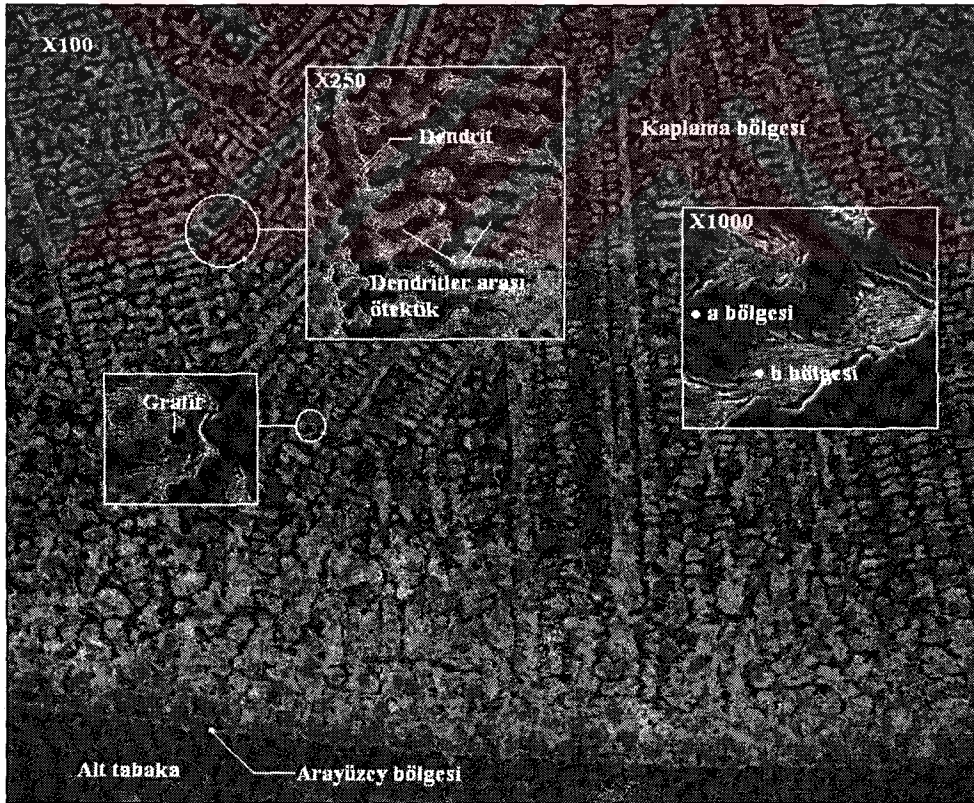
Element tipi	Yoğunluk oranı	% Standart oranı	% Ağırlık oranı	% Sigma	% Atom oranı
C	1.984	1.46	96.50	0.21	99.23
Fe	0.882	1.00	3.50	0.21	0.77
Toplam			100.00		100.00

Şekil 7.19: 11 nolu numune için "a" bölgesinin EDS analiz sonucu

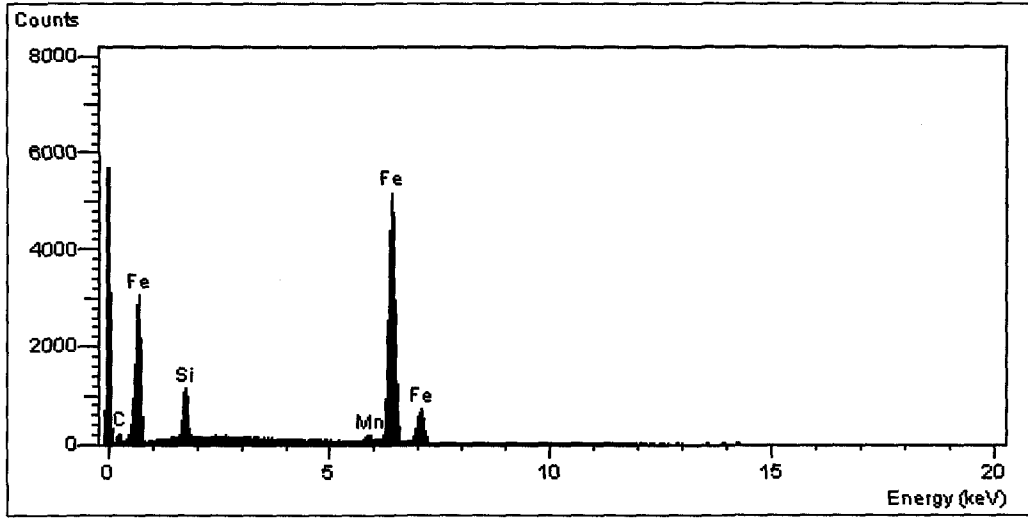


Element tipi	Yoğunluk oranı	% Standart oranı	% Ağırlık oranı	% Sigma	% Atom oranı
Si	0.748	1.04	4.22	0.11	8.05
Mn	0.969	1.00	1.01	0.15	0.98
Fe	0.991	1.00	94.78	0.18	90.97
Toplam			100.00		100

Şekil 7.20: 11 nolu numune için “b” bölgesinin EDS analiz sonucu

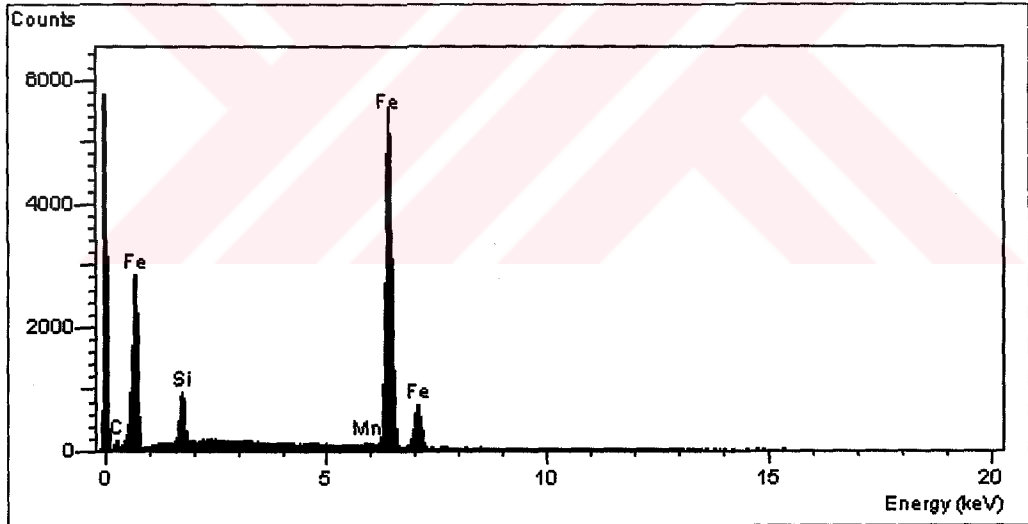


Şekil 7.21: 18 nolu numunenin SEM fotoğrafı (X100)



Element tipi	Yoğunluk oranı	% Standart oranı	% Ağırlık oranı	% Sigma	% Atom oranı
C	0.490	1.46	6.13	0.32	22.31
Si	0.758	1.04	5.35	0.12	8.33
Mn	0.958	1.00	1.83	0.16	1.46
Fe	0.979	1.00	86.70	0.35	67.90
Toplam			100.00		100.00

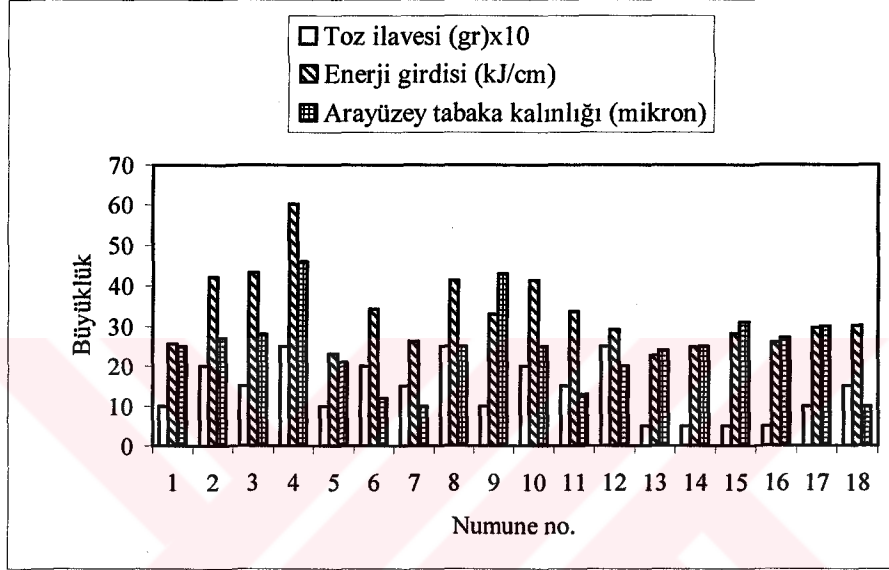
Şekil 7.22: 18 nolu numune için “a” bölgesinin EDS analiz sonucu



Element tipi	Yoğunluk oranı	% Standart oranı	% Ağırlık oranı	% Sigma	% Atom oranı
C	0.500	1.46	3.65	0.28	14.41
Si	0.751	1.04	4.36	0.11	7.37
Mn	0.964	1.00	0.68	0.15	0.59
Fe	0.984	1.00	91.31	0.32	77.62
Toplam			100.00		100.00

Şekil 7.23: 18 nolu numune için “b” bölgesinin EDS analiz sonucu

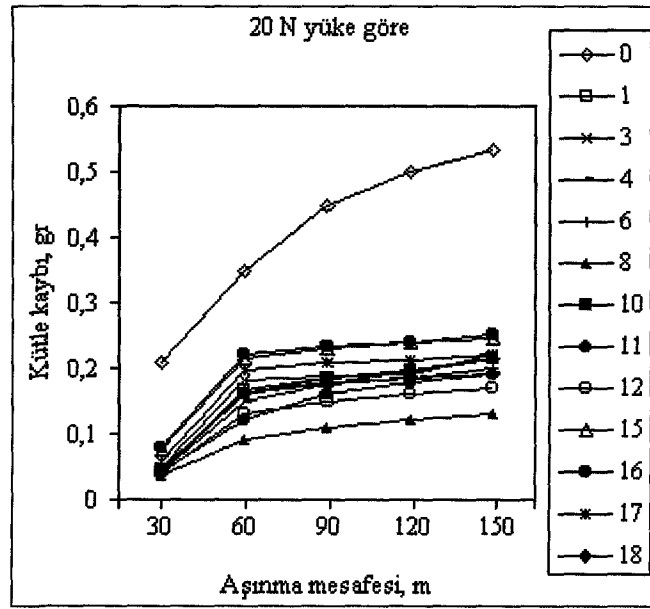
Numunelerde enerji girdisinin artmasıyla (sabit toz ilavesinde) Fe_7C_3 ve Fe_2C artmış, FeSi_2 'nin miktarı ise azalmıştır. Bu duruma Thawari ve arkadaşlarının (2003) yaptıkları çalışmada da rastlanılmıştır. Ayrıca enerji girdisinin artmasıyla (toz ilavesi sabit) arayüzey bölgesinin kalınlığı da artmaktadır. Artan toz ilavesiyle de (enerji girdisi sabit) arayüzey kalınlığı azalmaktadır. Bu durum fazla enerji girdisi durumunda alt malzemeden demirin kaplama malzemesiyle daha fazla reaksiyona girerek daha kalın bir arayüzey oluşturulmasıyla açıklanabilir. Toz miktarının fazla olması durumunda da reaksiyon için gerekli olan enerji yetersiz olmaktadır. Şekil 7.24'de enerji girdisinin ve toz ilavesinin arayüzey bölgesinin kalınlığına etkisi görülmektedir.



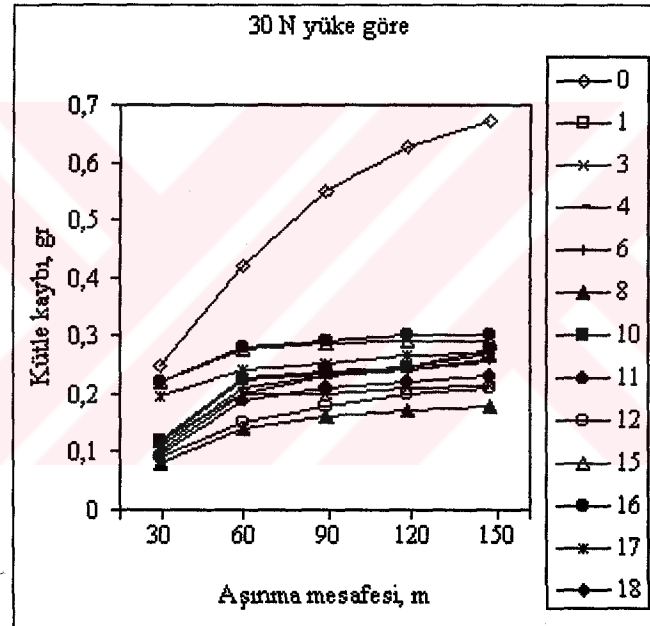
Şekil 7.24: Enerji girdisi ve toz ilavesinin arayüzey tabaka kalınlığına etkisi

7.2. Abrasif Aşınma Test Sonuçları

SiC ile yüzeyi modifiye edilen numunelerin abrasif aşınma testleri sonrası farklı yük değerlerinde, aşınma mesafesine bağlı olarak kütle kaybı değişim grafiği Şekil 7.25 ve Şekil 7.26'da verilmiştir.

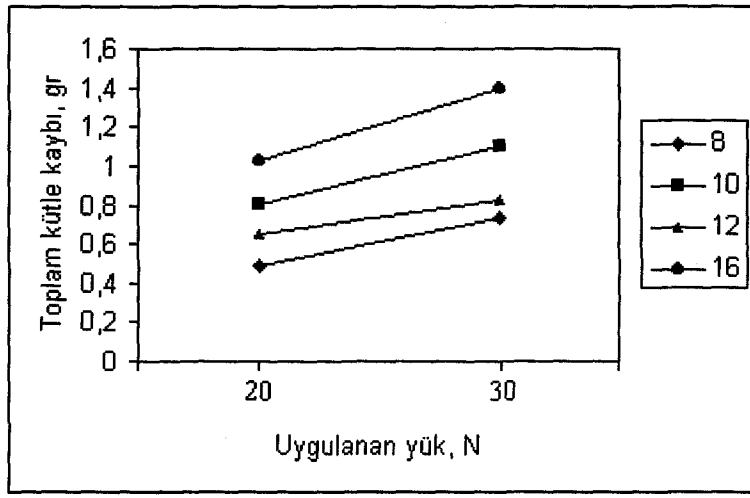


Şekil 7.25: SiC ile yüzeyi modifiye edilmiş numunelerin 20 N yüke göre aşınma mesafesine bağlı kütle kaybı değişim grafiği



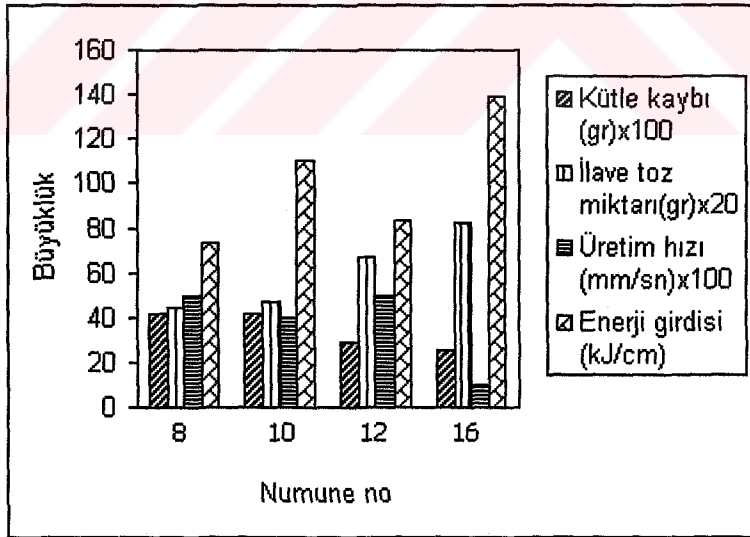
Şekil 7.26: SiC ile yüzeyi modifiye edilmiş numunelerin 30 N yüke göre aşınma mesafesine bağlı kütle kaybı değişim grafiği

Şekil 7.25 ve Şekil 7.26'de de görüldüğü gibi, farklı üretim parametreleri ile kaplanan numunelerde orijinal numuneye (0 nolu) göre abrasif aşınma testleri sonrası önemli derecede kütle kaybı farklılığı tespit edilmiştir. SiC ile kaplanan numunelerin kütle kayıp miktarları düşmüştür. 20 N yük değerinde, en fazla kütle kaybı kaplanan numunelerden 16 nolu numunede olurken, en düşük kütle kaybı ise 8 nolu numunede elde edilmiştir. 30 N yük değerinde ise, yine en fazla kütle kaybı 16 nolu numunede elde edilirken, en düşük kütle kaybı ise, 8 nolu numunede elde edilmiştir. Fakat 30 N yük değerinde kütle kaybının 20 N yük değerine nazaran daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.27).

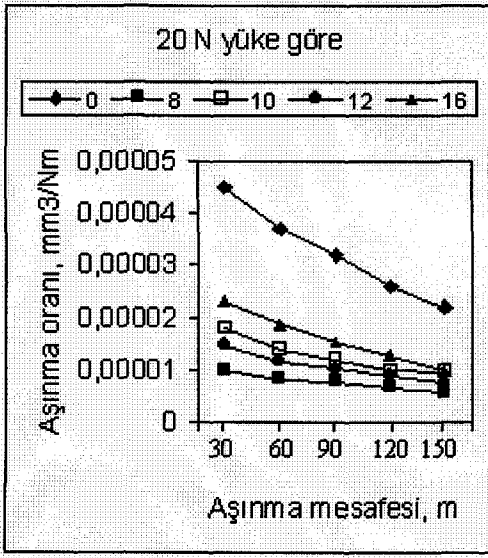


Şekil 7.27: SiC ile kaplanan numunelerin uygulanan yüke göre toplam kütle kaybı değişimi

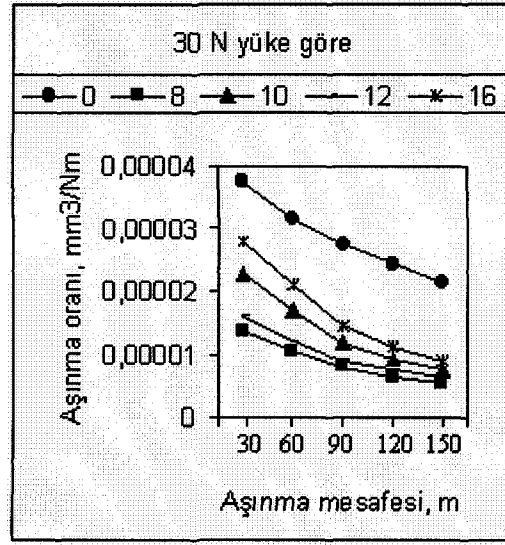
SiC ile yüzey modifikasyonu yapılan numuneler içinden, 0.44 mmsn^{-1} üretim hızında, 2.5 gr toz ilave değerinde ve 41.3 kJ/cm enerji girdisi ile elde edilen 8 nolu numunede 30 N yük değerinde 450 m aşınma mesafesinde toplam kütle kaybı 0.73095 gr iken; 0.82 mmsn^{-1} üretim hızında, 0.5 gr toz ilave değerinde ve 25.3 kJ/cm enerji girdisi ile üretilen 16 nolu numunede ise kütle kaybı değeri 1.39254 gr 'dır. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü gibi, üretim hızının fazla, toz miktarının ve enerji girdisinin az olduğu koşullarda kütle kaybı fazla olmakta; diğer koşullarda ise kütle kaybı az olmaktadır. Şekil 7.28'de kütle kaybının enerji girdisi, ilave toz miktarı ve üretim hızına bağlı ilişkisi verilmiştir.



Şekil 7.28: Kütle kaybının enerji girdisi, ilave toz miktarı ve üretim hızına bağlı ilişkisi



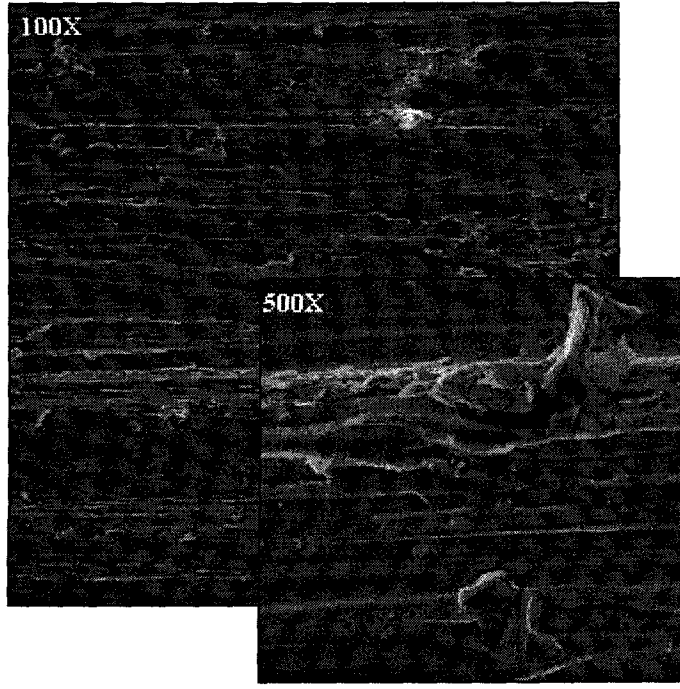
(a)



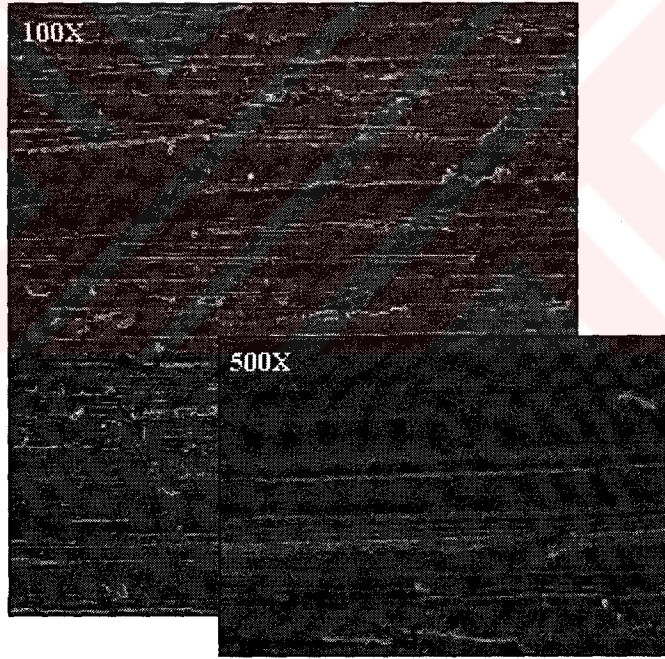
(b)

Şekil 7.29: SiC ile kaplanan numunelerin (a) 20 N yüke göre, (b) 30 N yüke göre aşınma mesafesine bağlı aşınma oranı değişimi

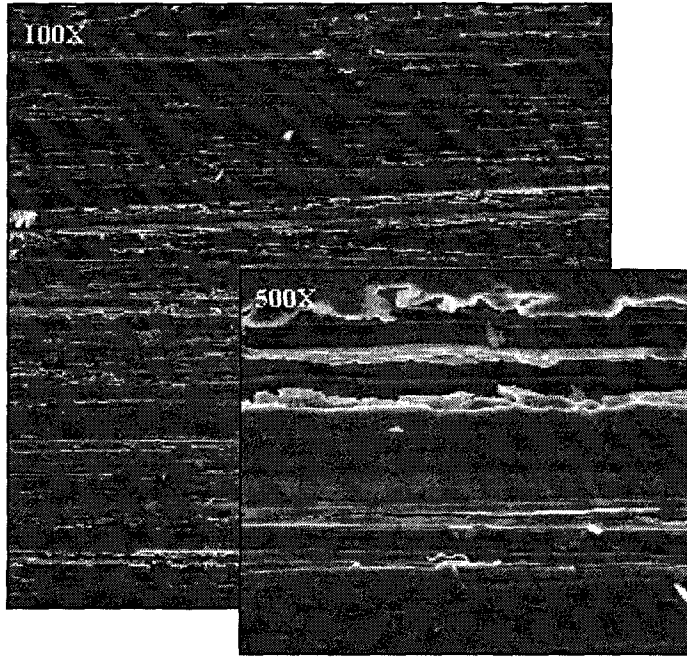
Şekil 7.29'de görüldüğü gibi numunelerin aşınma oranı değerleri, aşınma mesafesi arttıkça azalmaktadır. Aynı mesafe içinde yük miktarı arttıkça aşınma oranı değerleri azalmaktadır. En düşük aşınma oranı 8 nolu numunede tespit edilmiştir; yani 8 nolu numunenin aşınma direnci daha yüksektir. Şekil 7.30-Şekil 7.34 incelendiğinde de aşınma çizgilerinin en belirgin olduğu numune 0 nolu (orijinal numune) olup en fazla aşınandır (Şekil 7.30). SiC ile kaplanan numunelerden ise en belirgin çizikler 16 nolu numunede (Şekil 7.34), en belirsiz çizikler ise 8 nolu numunede gözlenmektedir (Şekil 7.31). Bu numunedeki aşınma miktarının fazlalığı, diğer numunelere göre yapıdaki silisyum içeriğinin azlığı ve buna bağlı olarak yapıya ayrıca sertlik veren FeSi_2 fazının daha az oluşması ile açıklanabilir.



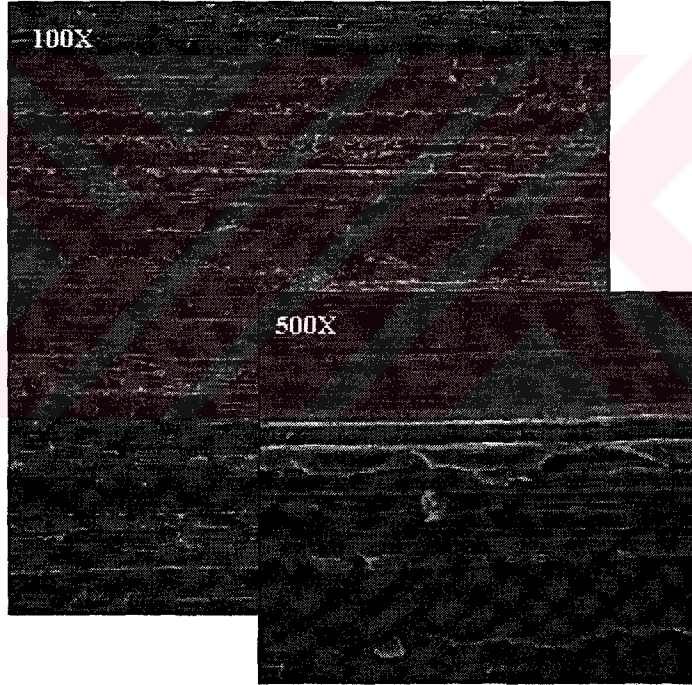
Şekil 7.30 : 0 nolu numunenin (orjinal numune) 20 N yük altında aşınma yüzeyinden alınan SEM fotoğrafı



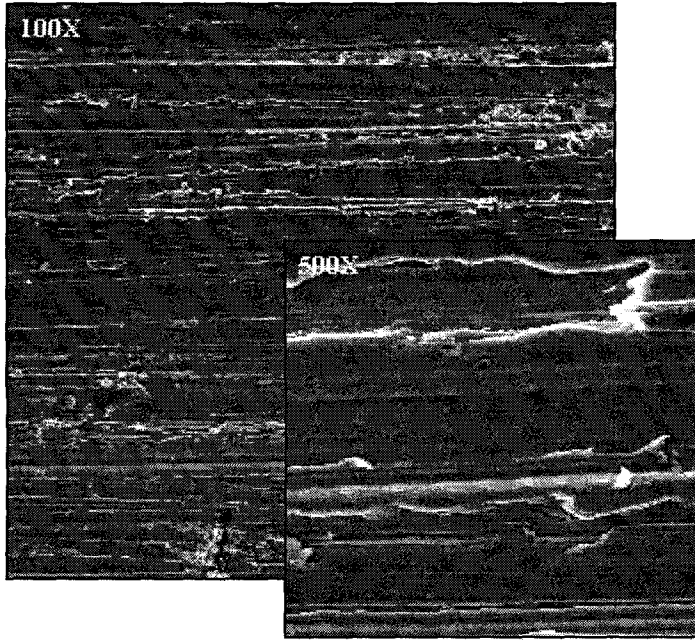
Şekil 7.31 : 8 nolu numunenin 20 N yük altında aşınma yüzeyinden alınan SEM fotoğrafı



Şekil 7.32: 10 nolu numunenin 20 N yük altında aşınma yüzeyinden alınan SEM fotoğrafı



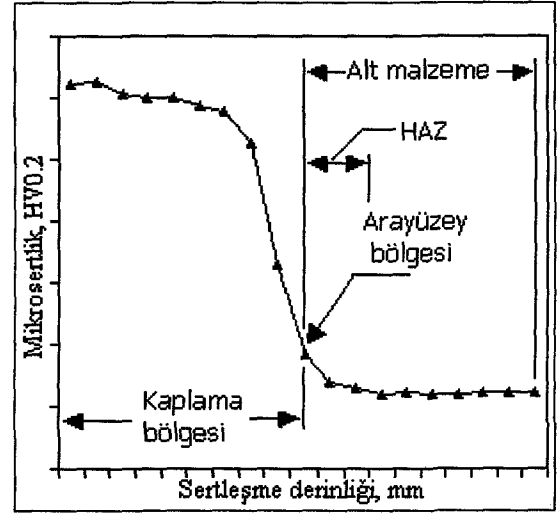
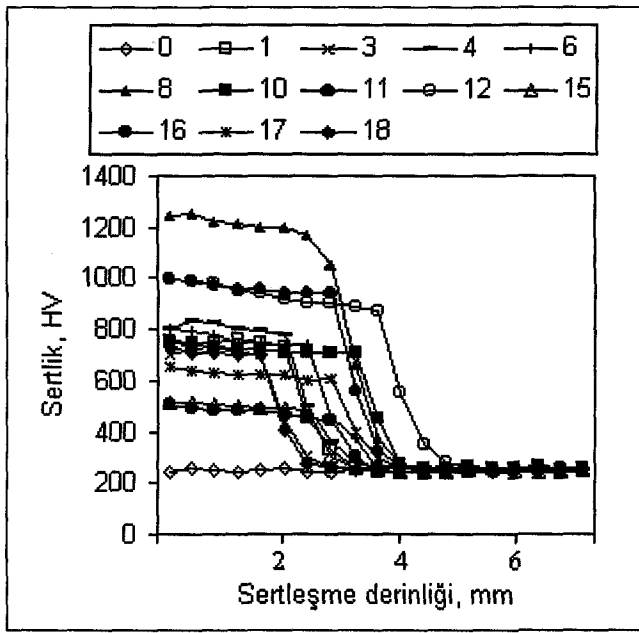
Şekil 7.33: 12 nolu numunenin 20 N yük altında aşınma yüzeyinden alınan SEM fotoğrafı



Şekil 7.34: 16 nolu numunenin 20 N yük altında aşınma yüzeyinden alınan SEM fotoğrafı

7.3. Sertlik Ölçüm Sonuçları

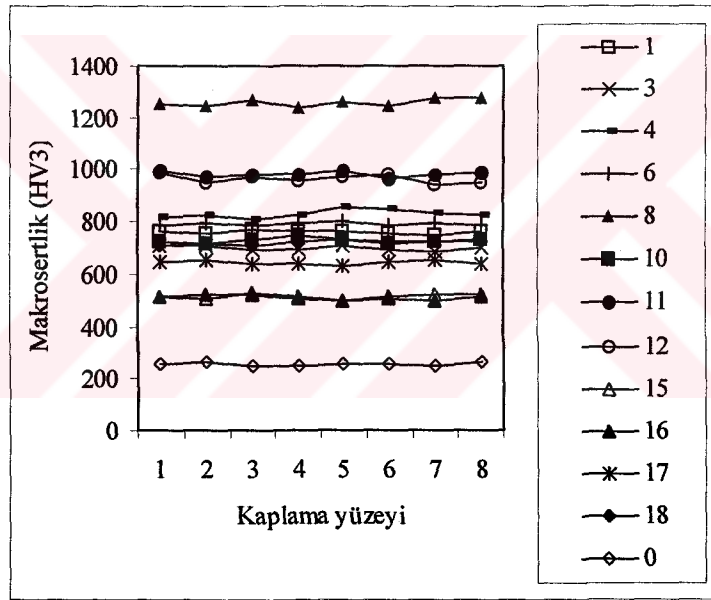
SiC ile yüzeyi modife edilen numunelerin mikrosertlik ölçümleri, kaplama yüzeyinin 0.5 mm altındaki bölge ile alt tabaka arasında bir hat boyunca 200 gr yük ($HV_{0.2}$) uygulayarak, dendrit ve dendritler arası bölgeyi ise 30 gr yük uygulayarak yapılmıştır. 8 nolu numunede dendrit (beyaz bölge) üzerinden alınan mikrosertlik 1448 $HV_{0.2}$ iken, dendritler arası bölge (siyah bölge) üzerinden alınan sertlik ise 815 $HV_{0.2}$ 'dir. 16 nolu numunede ise dendrit sertliği, 825 $HV_{0.2}$, dendritler arası bölgenin mikrosertliği ise 438 $HV_{0.2}$ 'dir. Kaplama bölgesi ile alt tabaka arasındaki sertlik değişiminde ise kaplama bölgesinin sertliği maksimum değerdeyken ve arayüzeye doğru yaklaşıldığında az miktarda azalırken, arayüzeyde ani bir şekilde düşmektedir. Isı etkisi altında kalan bölgenin (HAZ bölgesinin) sertliği ise alt malzemenin sertliğinden biraz yüksek değerdedir. Örneğin; 8 nolu numunede kaplama bölgesinin sertliği 1000-1250 $HV_{0.2}$ iken, arayüzey sertliği 500-600 $HV_{0.2}$, HAZ bölgesinin mikrosertlik değişimi ise 300-550 $HV_{0.2}$ arasındadır. Bu durum Fe içeriğinin kaplama bölgesinde daha az, arayüzey bölgesinde ise daha fazla olmasıyla; ayrıca kaplama bölgesinde Fe_7C_3 , Fe_2C ve $FeSi_2$ gibi sert fazların yoğunluğunun fazla, arayüzeye doğru bu yoğunluğun azalması ve tanelerin kaplama bölgesinde küçük, arayüzeye doğru ise büyük boyutta olması, ısı etkisi altında kalan bölgenin (HAZ bölgesinin) sertliği ise martenzitik faz dönüşümü ile açıklanabilir (Thawari ve diğ., 2003; Wang ve Duan, 2002; Li ve diğ., 2003; Yang ve diğ., 2004; Jian ve Wang, 2004). Şekil 7.35a'da numunelerin kaplama bölgesi ile alt malzeme arasındaki mikrosertlik değişimi, Şekil 7.35b'de değişim bölgeleri, Şekil 7.36'da ise yüzeyden alınan makrosertlik değişimi verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 7.35: SiC ile yüzeyi modifiye edilen numunelerin (a) yüzeyden alt tabakaya doğru sertlik değişim grafiği, (b) Kaplamanın üst kısmından alt malzemeye doğru değişim bölgeleri



Şekil 7.36: SiC ile kaplanan numunelerin kaplama yüzeyinin mesafeye bağlı makrosertlik değişim grafiği

8. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, alt tabaka malzemesi olarak seçilen 45Mn5 çeliğinin yüzeyine SiC tozu kullanılarak GTA kaynak yöntemi ile yüzey modifikasyonu yapılmıştır. Modifikasyonlu numunelerin makrosertlik ve mikrosertlik ölçümleri yapılarak, sertlik değişimi incelenmiştir. Ayrıca numunelere abrasif aşınma testleri uygulanarak, aşınma oranları belirlenmiş; meydana gelen mikroyapının aşınma direnci üzerine etkileri ve bununla birlikte optimum üretim parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmalar neticesinde şu sonuçlara varılmıştır:

- a. Yüzeye geçirilen SiC tozunun tamamen alaşımlanmış bölgede çözündüğü XRD ve EDS analizleri ile tespit edilmiştir.
- b. Bazı numunelerde kaplama yüzeyinden arayüzeye doğru çatlaklar gözlenmiştir. Bunun da kalıntı ısı gerilmelerden ileri geldiği tahmin edilmektedir. Yapılan mikroyapı incelemelerinde gözeneklere de rastlanılmıştır.
- c. Alaşımlanmış bölgede siyah ve beyaz olmak üzere iki tip mikroyapı ağı gözlenmiştir. Beyaz bölgeler; yani dendritler siyah bölgeleri; yani ötektik yapıları kuşatmaktadır. Arayüzeyden kaplamanın üst kısmına doğru dendritlerin boyut ve doğrultularının değiştiği gözlenmiştir. Dendritli yapıda Fe_2C ve Fe_7C_3 fazları oluşmuş; ötektik yapıda ise $FeSi_2$ fazı görülmüştür. Enerji girdisinin artmasıyla demir içeriğinin arttığı gözlenmiştir. Ayrıca arayüzeye yakın bölgelerde küresel biçimli grafitler tespit edilmiştir.
- d. Yapılan mikro gözlemlerde arayüzeye yakın bölgelerde planar kristalleşmenin (büyük martenzit iğnelerini içeren), kaplamanın merkez kısmında kolumnar kristalleşmenin ve yüzeye yakın bölgelerde ise dendritik/iğneli kristalleşmenin olduğu belirlenmiştir.
- e. Enerji girdisinin artmasıyla (sabit toz miktarı) arayüzey tabaka kalınlığının arttığı, toz miktarının artmasıyla da (sabit enerji girdisi) arayüzey tabaka kalınlığının azaldığı gözlenmiştir.
- f. Dendritik yapıların sertliğinin dendrit kolları arasındaki ötektik yapılara göre daha fazla çıktığı gözlenmiştir. Kaplamanın yüzeyinden alt tabaka malzemeye doğru bir hat boyunca alınan mikrosertlik ölçümlerinde, arayüzeye kadar fazla bir değişimin olmadığı, arayüzey bölgesinde ani olarak düştüğü ve alt tabaka malzemedeki normal sertliğe ulaştığı mikrosertlik ölçüm sonuçlarında gözlenmiştir. Bunun sebebinin arayüzeye doğru tanelerin büyümesi, demir içeriğinin kaplama bölgesinde az, arayüzey/alt tabaka malzemesi bölgesinde ise fazla olduğu ve sert fazların kaplama bölgesinde oluşması ile açıklanabilir. Ayrıca kaplama yüzeyinden alınan makrosertlik ölçümlerinden de kaydedeğer bir sertlik değerine (maksimum 1250 HV₃) ulaşıldığı belirlenmiştir. Yine sertliğin SiC ilavesi ile yükseldiği gözlenmiştir. En yüksek sertliğin 8 nolu numunede (1250 HV₃), en düşük sertliğin ise 16 nolu numunede (510 HV₃) olduğu görülmüştür.

- g. Yapılan abrasiv aşınma testleri sonucunda GTA kaynak yöntemi kullanarak ve SiC ilavesi yapılarak aşınma direncinin kaydadeğer bir şekilde arttığı belirlenmiştir. En iyi aşınma direnci 8 nolu numunede gözlenmiş, en kötü aşınma direnci ise kaplanmış numunelerden 16 nolu numunede olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebinin 16 nolu numunede karbon oranının fazla değişmemesine karşın, silisyum içeriğinin diğer numunelere göre daha az olmasına, dolayısı ile SiC ile diğer karbür ve fazların daha az miktarda oluşmasına bağlanmıştır. Üretim parametreleri referans alınarak en yüksek kütle kaybının, kaplama hızının yüksek, enerji girdisinin düşük ve toz ilavesinin az olduğu şartlarda olduğu tespit edilmiştir. Aksi durumlarda ise kütle kayıplarının diğerlerine oranla daha az olduğu belirlenmiştir.

Modifiye edilen numunelerin yüzeylerinde çatlak oluşumunu önlemek için tekrarlı paso yöntemi kullanılabilir. Böylece çatlaksız ve düzgün yüzey kalitesine sahip kaplamalar üretilebilir. Bundan sonra yapılacak araştırmalarda yine; tekrarlı pasonun numunenin mikroyapısı, mikrokimyası ve mekanik özellikleri üzerine olan etkileri incelenebilir.

Farklı toz kombinasyonları kullanılarak yüzey kompozitlerinin oluşumu sağlanabilir. Bu şekilde kompozit malzemelerde de mevcut olan özellik kombinasyonlarına ulaşılabilir. Ayrıca çok tabakalı yüzey kaplamalarının üretimi GTA kaynak yöntemi ile sağlanabilir.

Kaplama tozunun kaynak havuzuna iletimi bir iletim sistemi ile sağlanarak daha kaliteli kaplama yapısı elde edilebilir. Bu sayede kaplama tozu kaybının önüne geçilip, tozun kaynak havuzuna hapsedilmesi daha kolay sağlanabilir.

45Mn5 çeliğine geleneksel yüzey sertleştirme ısı işlemleri uygulanarak mekanik özellikleri belirlenip, GTA' ya da benzer tekniklerle yüzeyi alaşımlandırılmış numuneler ile karşılaştırılabilir. Bu şekilde uygun yöntemin seçimi sağlanabilir.

GTA ile yüzeyi alaşımlandırılmış numunelere çentik darbe testi uygulanarak kaplama/arayüzey/alt tabaka malzeme üçleminin özelliklerinin darbe dayanımı üzerine olan etkileri incelenebilir.

Yüzeyi kaplanmış numunelere bilgisayar destekli ortamda abrasif ve adhesif aşınma testleri uygulanarak üretim parametrelerinin testler üzerine etkileri araştırılabilir.

9. KAYNAKLAR

- Akay, S., Sarı, N.Y., Kaluç, E., 1997, "Aşınmayı Önlemede Etkili Yöntemler: Isıl Püskürtme", Mühendis ve Makine Dergisi, Sayı: 448, 19-25.
- Bach, F.W., Duda, T., 2000, "Moderne Beschichtungsverfahren", DGM Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V., Willey-VCH, Weinheim-New York, 80-103.
- Bargel, H.J., Schulze, G., 1980, "Werkstoffkunde", VDI Verlag, Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 44-45, 180-181.
- Batchelor, A.W., Stachowiak, G.W., 2000, "Engineering Tribology", Second Edition, Boston Oxford Auckland Johannesburg Melbourne, New Delhi, 571-592.
- Bhushan, B., Gupta, B.K., 1991, Handbook of Tribology, McGraw-Hill, Inc., USA.
- Bourithis, L., Papaefthymiou, S., Papadimitriou, G.D., 2002, "Plazma Transferred Arc Boriding of A Low Carbon Steel: Microstructure and Wear Properties", Applied Surface Science, Greece, 205.
- Bourithis, L., Milonas, A., Papadimitriou, G.D., 2003, "Plasma Transferred Arc Surface Alloying of A Construction Steel To Produce A Metal Matrix Composite Tool Steel With TiC As Reinforcing Particles", Surface and Coatings Technology, 286-295.
- Böhm, H., 1968, "Einführung in die Metallkunde, BI Hochschultaschenbücher für Ingenieur, Bibliographisches Institut 196/196a, Mannheim/Zürich, 227-232.
- Buijnsters, J.G., Shankar, P., Sietsma, V., Mevlen, J.J., 2003 "Gas Nitriding of Chromium in NH_3/H_2 Atmosphere", Materials Science and Engineering, 189-295.
- Bunshah, R.F., 1982, "Deposition Technologies for Films and Coatings", USA, 85.
- Bunshah, R.F., 2001, "Handbook of Hard Coatings: Deposition Technologies, Properties and Applications", Noyes Publications Park Ridge, New Jersey, USA, 77-107.
- Buytoz, S., 2004, "AISI 4340 Çeliğinin Nitrürasyon ve GTA Kaynak Yöntemi İle Yüzey Modifikasyonu İşlemleri Sonrası Mekaniksel Davranışlarının Araştırılması", Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- Cabeo, E.R., Laudien, G., Biemer, S., Rie, K.-T., Hoppe, S., "Plasma-Assisted Boriding of Industrial Components in a Pulsed D.C. Glow Discharge", Surface and Coating Technology, 116-119 (1999) 229-233.
- Charles, P.H., 1994, "Thermal Spraying: Process, Preparation, Coatings and Application", Welding Journal, 73 (4), 47-51.
- Cheng, F.T., Kwok, C.T., Man, H.C., Surf. Coat. Technol. 139 (2001) 14.
- Chiu, L.H., Yang, C.F., Hsieh, W.C., Cheng, A.S., 2002, "Effect of contact pressure on wear resistance of AISI H13 tool steels with chromium nitride and hard chromium coatings", Surface and Coating Technology 154 (2002) 2-3, 282-288.

- Clare, H.J., Crawmer, D.E., 1992, "Thermal Spray Coatings", Metals Handbook, Vol.5, 361-375.
- Connor, L.P., 1987, "Welding Handbook", American Welding Society, Eighth Edition, Vol. 1, 11-12.
- Dearnley, P.A., 1987, "Thin Hard Coatings for Tribological Protection", Heat Treatment of Metals, Vol. 4, 83-91.
- Dubourg, L., Pelletier, H., Vaissiere, D., Hlawka, F., Cornet, A., 2002, "Mechanical Characterization Of Laser Surface Alloyed Aluminum-Copper Systems", Wear, 253, 1077-1085.
- Edenhofer, B., Grenfen, W., Muller-Ziller, J., 2001, "Plasma Carburizing A Surface Heat Treatment Process for New Century", Surface and Coating Technology, 142-144.
- Edrisy, A., Perry, T., Cheng, Y.T., Alpas, A.T., 2001, "Wear of Thermal Spray Deposited Low Carbon Steel Coatings on Aluminum Alloys", Wear, 1023-1033.
- Eroğlu, M., Özdemir, N., 2002, "Tungsten-Inert Gas Surface Alloying of a Low Carbon Steel", Surface Coating Technology, 209-217.
- Fichtl, W., Trausner, N., Matuschka, A.G., 1980, "Boronizing with Bor", Boronizing, Heyden & Son Inc. Philadelphia, 58-71.
- Habig, K.H., 1986, "Chemical Vapour Deposition and Physical Vapour Deposition Coatings Properties Tribological Behaviour and Applications", J.Vacuum Science Technology A.4 (6), American Vacuum Society, 2832-2843.
- Habig, K.H., 1989, "Wear Behaviour of Surface Coatings on Steels", Tribology International, Vol. 22, 65-73.
- Harris, I.D., 1993, "Plasma Arc Welding", Welding, Brazing and Soldering, Vol.6, ASM Handbook, 195-199.
- Hicken, G.K., 1993, "Gaz-Tungsten Arc Welding", Welding, Brazing and Soldering, Vol.6, ASM Handbook, 190-194.
- Hutchings, I.M., 1992, "Tribology: Friction and Wear Engineering Materials", Edward Arnold, 118-136.
- İpek, R., Karamış, M.B., 1999, "Aşınma Test Yöntemleri ve Gelişmeler", TMMOB, MMO, Yayın No:469, Ankara.
- Jährling, F., Rück, D.M., Fuess, H., 1999, "Hardness, Wear and Microstructure of Carbon Implanted AISI M2 High Speed Steel", Surface Coating Technology, Vol.111, 2-3 (1) 1999, 111-118.
- Jian, L.N., Wang, H.M., 2004, "Microstructure And Wear Behaviours Of Laser-Clad $\text{Cr}_{13}\text{Ni}_5\text{Si}_2$ -Based Metal Silicide Coatings On A Titanium Alloy", Surface and Coating Technology, 2-3 (3), 2004, 1-6.
- Kaestner, P., Olfe, J., Rie, K.-T.; 2001, "Plasma-Assisted Boriding of Pure Titanium and TiAl6V4 ", Surface and Coating Technology, 142-144 (2001) 248-252.
- Karamış, M.B., Nair, F., Selçuk, B.; 1995, "Borlanmış Malzemelerin Tribolojik Özellikleri", 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, 13-14 Nisan 1995, Denizli , 446-454.

- Kayacan, M.C., Çolak, O., 2004, "A Fuzzy Approach For Induction Hardening Parameters Selection" University of Suleyman Demirel, CAD/CAM Center, Isparta, Materials and Design, 155-161
- Kayalı, E.S., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y., Çimenoglu, H., 1997, "Hasar Analizi Seminer Notları", İstanbul..
- Kılık, R., Danışman, Ş., 1997, "Yüksek Vakum Teknolojisi ile Modern Kaplama Teknikleri", 7. Denizli Malzeme Sempozyumu, 362-363.
- Korkut, M.H., 1997, "Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Mikro Yapısı ve Aşınması Üzerine Karbür Yapıcı Elementlerin Etkilerinin Araştırılması", Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- Küper, A., Qiao, X., Stock, H.R., Mayr, P., "A Novel Approach To Gas Boronizing", Surface and Coating Technology, 130 (2000) 87-94.
- Liau, Z.L., Mayer, J.W., 1980, "Ion Bombardment Effects on Materials Composition", Materials Science and Technology, Vol. 18, 1-15
- Liu, D.M., Yang, Q., Troczynski, T., 2002, "Sol-Gel Hydroxyapatite Coatings on Stainless Steel Substrates", Biomaterials, 691-698.
- Li, Q., Song, G.M., Zhang, Y.Z., Lei, T.C., Chen, W.Z., 2003, "Microstructure And Dry Sliding Wear Behavior Of Laser Clad Ni-Based Alloy Coating With The Addition Of SiC", Wear, 254, 222-229
- Lucas, A., Lambin, Ph., Vignerun, J-P., Dereux, A., Laloyaux, Th., 1990, "Classical and quantum tunnelling in microstructure", Superlattices and Microstructure, 8(1990)1, 29-33
- Matthew, K., Hedges, A.P., Newbery, P.S., 2002, "Characterisation of Electric Arc Spray Formed Ni Superalloy IN718", Materials Science and Engineering, 79-91.
- Matuschka, A.G.; "Boronizing", 1980, McGraw-Hill Comp., Heyden, London, 55.
- Mellor, J.E., 2001, "Investigation of A Sol-Gel Coating Technique for Polarized 3He Target Cells", Williamsburg, Virginia
- Meriç, C., Atik, E., Yunker, U., 2003, "The Effects of Conventional Heat Treatment and Boronizing on Abrasive Wear and Corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 Steels", Tribology International, 155-161.
- Meriç, C., Şahin, S., Yılmaz, S.S., 2000, "Investigation of The Effect on Boride Layer of Powder Grain Size Used in Boronizing With Boron-Yielding Substances", Materials Research Bulletin, Vol.35, No. 13, 38-49.
- Minnick, W.H., 1996, "Gas tungsten arc welding handbook", Building Trades, Metal Working/Welding, Published by Goodheart-Wilcox, ISBN: 1590705815.
- Moore, R.L., Salvati, J., 1985, "Surface Analysis of Diffusion Zones in Multiple Chemical Vapour Deposition Coatings", J. Vacuum Science Technology, 2426-2431.

- Mridha, S., Ong, H.S., Poh, L.S., Cheang, P., 2001, "Intermetallic Coatings Produced By TIG Surface Melting", *Journal of Materials Processing Technology*, 516-520
- O'Brien, J.M., 1991, "Plasma (Ion) Nitriding", *ASM Handbook*, Vol. 4, Heat Treating, p. 420-424 USA
- Ogborn, J.S., 1993, "Submerged Arc Welding", *Welding, Brazing and Soldering*, Vol.6, ASM Handbook, 202-209.
- Olding, T., Sayer, M., Barrow, D., 2001, "Ceramic Sol-Gel Composite Coatings for Electrical Insulation", *Thin Solid Films*, 581-586.
- Olofinjana, A.O., Bell, J.M., Jamting, A.K., 2000, "Evaluation of The Mechanical Properties of Sol-Gel-Deposited Titania Films Using Ultra-Micro-Indentation Method", *Wear*, 174-179.
- Özenbaş, M., 1995, "Sert Kaplama Teknolojisindeki Gelişmeler ve Elmas Filmler", 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, 162-171.
- Quinto, T.D., Wolfe, J.G., Jindal, P.C., 1987, "High Temperature Microhardness of Hard Coatings Produced By Physical and Chemical Vapour Deposition", *Thin Solid Films*, 18-36.
- Pantleon, K., Kessler, O., Hoffann, F., Mayr, P., 1999, "Induction Surface Hardening of Hard Coated Steels", *Surface and Coatings Technology*, 495-501, Bremen, Germany
- Richardson, M., 1995, "Semiautomatic Cold Wire Feeder Systems Increase GTA Productivity", *Welding Journal*, January (1995), 51-54
- Redeghiero, E.D., Moore, B.C., Wolkenberg, B.S., Wudhenow, M., Tse, O.K., Giannelis, E.P., 1998, "Sol-jel synthesis of ceramic matrix composites", *Materials Science and Engineering A*, 244(1998)1, 14-21.
- Sandven, O.A., 1991, "Laser Surface Hardening", *ASM Handbook*, Vol. 4, Heat Treating, s. 286-296, USA
- Saraç, S., 1995, "Metal Kaplamalar ve Elektrokimyasal Teknolojiler", İTÜ, 139-150.
- Savaşkan, T., 1999, "Malzeme Bilgisi ve Muayenesi", KTÜ, Trabzon, 208-210.
- Schaaf, P., 2002, "Laser Nitriding of Metals", *Progress in Materials Science*, 1-61.
- Schmidt, H., Mennig, M., 2000, "Wet Coating Technologies for Glass", *The Sol-Gel Gateway*, INM, Institut für Neue Materialien, Saarbrücken, Germany.
- Scharma, S.R., Ma, Z.Y., Mishra, R.S., 2004, "Effect of Friction Stir Processing on Fatigue Behavior of A356 alloy", *Scripta Materialia*, Vol.51, 3 (2004) 8, 237-241.
- Sert, H., Karamış, B., 1993, "PVD ve CVD Yöntemleriyle Yüzey Kaplama ve Kaplama Özellikleri", 5. Denizli Malzeme Sempozyumu, 571-579.
- Sert, H., Meriç, C., 1991, "MKE 1050 Çeliğe Uygulanan Sıcak ve Soğuk Çelik Toz Metal Püskürterek Yüzey Kaplama ve Mekanik Deneyleri", 4. Denizli Malzeme Sempozyumu, 516-523.

- Sert, H., 1997, "PVD ile TiN Kaplanmış Alüminyum Ekstrüzyon Kalıplarının Yüzey Özellikleri ve Aşınma Performanslarının Deneysel İncelenmesi", Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, 4-9.
- Simao, J., Aspinwall, D.K., 1999, "Hard Chromium Plating of EDT Mill Work Rolls", J. Mater. Proces. Technol., 281-287.
- Sinha, A.K., 1991, "Boriding (Boronizing)", ASM Handbook, Vol. 4, Heat Treating, 437-447, USA.
- Smith, S.T., Harb, S., Eastwick-Field, V., Yao, Z.Q., Bartlett, P.N., Chetwynd, D.G., Gardner, J.W., 1993, "Tribological properties of electroactive polymeric thin film bearing", Wear, 169(1993)1, 43-57
- Spies, H.J., Schaaf, P., Vogt, F., 1998, Material Wissenschaft und Werkstofftechnik, 588-594
- Staines, A. M., 1985, "Thermochemical Treatments in A Glow Discharge Environment", Surface Engineering, 739.
- Sun, Z., Kuo, M., Pan, D., 1999, "Twin-Wire Gas Tungsten Arc Cladding Offers Increased Deposition Rates", Welding Journal, October (1999), 61-64
- Tan, J.C., Looney, L., Hashmi, M.S.J., 1999, "Component Repair Using HVOF Thermal Spraying", Journal of Materials Processing Technology, 203-208.
- Thawari, G., Sundararajan, G., Joshi, S.V., 2003, "Laser Surface Alloying of Medium Carbon Steel with SiC_p", Thin Solid Films, 423, 41-43.
- Topbaş, M.A., 1998, "Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı", Prestij Basım, İstanbul, 88-95.
- Tur, K., 1993, "İyon İmplantasyonu Teknolojisinin Metallerin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesinde Kullanımı", 5. Denizli Malzeme Sempozyumu, 532-539.
- Tusek, J., Suban, M., 2003, "High – Productivity Multiple Submerged – Arc Welding and Cladding With Metal–Powder Addition", Journal of Materials Processing Technology, 207-213.
- Tyler, J.M., 1995, "Automotive Applications for Chromium", Metal Finishing, 11-14.
- Villat, M., 1986, "Functionally Effective Coatings Using Plasma Spraying", Sulzer Technical Review, Vol.3, 41-45.
- Vitanov, V.I., Voutchkov, I.I., Bedford, G.M., 2000, "Decision Support System To Optimize The Frictec (Friction Surfacing) Process", Journal of Materials Processing Technology, 107 , 236-242
- Wang, H.M., Duan, G., 2002, "High-temperature wear resistance of a laser-clad Cr₃Si reinforced metal silicide composite coating", Scripta Materialia, 46 (2002)1, 107-111.
- Yang, S., Liu, W., Zhong, M., Wang, Z., 2004, "TiC Reinforced Composite Coating Produced By Powder Feeding Laser Cladding", Materials Letters, 1-5
- Yıldırım, M.M., 1989, "Galvanizleme Tekniği", T.C. Fırat Ün., Teknik Eğitim Fakültesi Yayınları, Yayın No: 133, Elazığ, 18-31.

- Yıldırım, M.M., 1993, “Lazerle Yapılan Yüzeysel İşlemlerde Son Uygulama Teknikler”, 5. Denizli Malzeme Sempozyumu, Bildiri Kitabı, 561-570.
- Yıldırım, M.M., 1984, “Çelik Mazemelerde Endüksiyonla Yüzey Sertleştirme”, TMMOB, Metalurji Mühendisleri Odası, Metalurji Dergisi, Sayı 30, 8-16.
- Yıldırım, M.M., Doğan, Z.S., Çakan, A., Pakdil, M., 2001, “Mühendislik Malzemesi, Cilt I”, MKÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İskenderun, 114-124.
- Yoon, J.H., Jee, Y.K., Lee, S.Y., 1999, “Plasma Paste Boronizing Treatment of The Stainless Steel AISI 304”, Surface and Coating Technology, 112 (1999), 71-75.
- Zeng, A., Liu, E., Hing, P., Zhang, S., Tan, S.N., Annergren, I.F., Gao, J., 2002, “Microstructure and electrochemical behavior of sputtered diamond-like carbon films”, International Journal of Modern Physics B, 16 (2002)6-7, 1024-1030.



ÖZGEÇMİŞ

04.01.1980 tarihinde Zonguldak'ta doğan Serkan ISLAK; ilk, orta ve lise öğrenimini Zonguldak'ta tamamladı. 1998 yılında F.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı ve 2002 yılında aynı bölümden mezun oldu. Aynı yıl F.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü, Metalurji Eğitimi (Malzeme Anabilimi) Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve halen aynı bölümde yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir.

