

**JET MOTORLARINDA PARÇA YENİLEME
İŞLEMLERİ**

Serdar DALKILIÇ
Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü
Sivil Havacılık Anabilim Dalı
Haziran – 2001

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Serdar Dalkılıç'ın Jet Motorlarında Parça Yenileme İşlemleri başlıklı **Sivil Havacılık** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi 02/08/2001 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı - Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Yrd. Doç. Dr. A. Akile TANATMIŞ	
Üye	: Prof. Dr. Hidayet BUĞDAYCI	
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..8..8..2001..... tarih ve25/7..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

JET MOTORLARINDA PARÇA YENİLEME İŞLEMLERİ

SERDAR DALKILIÇ

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Danışman: Yard. Doç. Dr. A. Akile TANATMIŞ
2001, 145 sayfa

Bu tezde jet motorlarına uygulanan gelişmiş parça yenileme işlemleri ele alınmıştır. Çalışmada yenileme işlemleri üç ana grupta toplanmıştır. Birinci grupta jet motorlarına uygulanan kaynak ve sert lehim işlemleri ele alınmıştır. Gaz kaynağı tekniklerinden oksiasetilen kaynağı, ark kaynağı tekniklerinden gaz-tungsten ark kaynağı, gaz-metal ark kaynağı, koruyuculu metal ark kaynağı ve plazma ark kaynağı, ışın kaynağı tekniklerinden de elektron ışın kaynağı ve lazer ışın kaynağı incelenmiş avantaj ve dezavantajları belirtilerek uygulama alanlarına örnekler verilmiştir.

İkinci grupta gelişmiş işleme yöntemlerinden elektrokimyasal işleme, elektrikli aşındırma ile işleme, elektrokimyasal taşlama ve lazer ışınıyla işleme yöntemleri incelenmiş, avantaj ve dezavantajları belirtilerek uygulama alanlarına örnekler verilmiştir.

Üçüncü grupta da koruyucu kaplamalar ele alınarak difüzyonlu kaplamalar, MCrAlY üst yüzey kaplamaları, metalik-seramik kaplamalar, termal bariyer kaplamalar ve termal sprey kaplamalar incelenmiş ve kullanım alanlarına örnekler verilmiştir.

Çalışmada bu gelişmiş yenileme işlemlerinin haricinde uygulanan diğer yardımcı işlemlerden temizleme, kumlama, boyama işlemleri ve ısı işlemleri de kısaca tanıtılmıştır.

Türk Hava Kuvvetleri envanterinde bulunan F-16 savaş uçaklarında kullanılan ve General Electric firması tarafından üretilen F110-GE-100/129 turbofan motorlarına, Eskişehir 1. Hava İkmal Bakım Merkezi Jet Revizyon Müdürlüğü'nde uygulanan yenileme işlemlerine örnekler verilmiştir.

Sonuç bölümünde de, çalışma içinde ele alınan yenileme işlemlerinin avantaj ve dezavantajlarının yanı sıra, kullanım ömrünü dolduran motor komponentlerinin yenisi ile değiştirilmesi yerine gelişmiş teknolojilerle yenilenerek tekrar kullanılması sonucunda elde edilen kazanımlara ait bazı örneklerin değerlendirilmesi yapılarak ortaya çıkan sonuçlar verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jet Motoru, Parça Yenileme İşlemi, Kaynak ve Sert Lehim, Gelişmiş İşleme Yöntemleri, Koruyucu Kaplamalar

ABSTRACT**Master of Science Thesis****PART RENEWAL OPERATIONS ON JET ENGINES****SERDAR DALKILIÇ**

**Anadolu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Aviation Program**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. A. Akile TANATMIŞ
2001, 145 pages**

In this thesis advanced part renewal operations applied to jet engines are considered. Renewal operations are divided into three main groups. In the first group welding and brazing operations applied to the jet engines are considered. Oxyacetylene welding of gas welding techniques; gas tungsten arc welding, gas metal arc welding, shielded metal arc welding and plasma arc welding of arc welding techniques; electron beam welding and laser beam welding of beam welding techniques are studied, advantages and disadvantages are stated and examples of applications are given.

In the second group, electrochemical machining, electrochemical grinding, electro discharge machining and laser machining of advanced methods of machining are studied, advantages and disadvantages are stated and examples of applications are given.

In the third group protective coatings are considered, diffusion coatings, MCrAlY overlays, metallic-ceramic coatings, thermal barrier coatings and thermal spray coatings are studied and examples of applications are given.

In addition, in this thesis; auxiliary operations other than these advanced renewal operations, such as cleaning, blasting, shot peening, painting and heat treatments are briefly introduced.

Some examples of part renewal operations applied by Eskişehir 1st Air Support and Maintenance Center to F110-GE-100/129 turbofan engines which powers F-16 fighter of Turkish Air Force are given.

In conclusions, besides the advantages and disadvantages of parts renewal operations, some examples to benefits of renewing the components expired life limits and reusing the component instead of replacing are interpreted and the results are offered.

Keywords: Jet Engine, Part Renewal Operation, Welding and Brazing, Advanced Machining Methods, Protective Coatings

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında yardımlarından dolayı tez danışmanım Yard. Doç. Dr. A. Akile TANATMIŞ'a, Sivil Havacılık Anabilim Dalı Başkanı Prof. Dr. Hidayet BUĞDAYCI'ya, Yard. Doç. Dr. Dilek TURAN'a, Öğr. Grv. İsmet AKBABA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Sürekli bilgi ve tecrübelerine baş vurduğum ve tezin özellikle uygulama aşamasında bana her türlü yardımı veren Mühendislik Grup Amiri Hv. Yük. Müh. Yzb. Ali BAŞARAN'a, Turbofan Bakım Mühendisi Hv. Müh. Ütgm. Suat HALAT'a ve 1. HİBM Jet Revizyon Müdürlüğü'ne teşekkür ederim.

Çalışmam boyunca bana her türlü desteği veren ve en az benim kadar bu çalışmaya emek sarf eden eşim ESRA ve oğlum BERKTUĞ'a sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
 1. GİRİŞ.....	 1
 2. PARÇA YENİLEME/DEĞİŞTİRME KARAR FAKTÖRLERİ.....	 3
2.1. Pozitif Faktörler.....	3
2.1.1. Program maliyetlerinin azaltılması.....	3
2.1.2. Komponent servis ömrünün artırılması.....	4
2.1.3. Uçuş emniyetinin geliştirilmesi.....	5
2.1.4. İkmal güvenliği.....	5
2.1.5. Endüstriyel tabanın gelişmesi.....	6
2.2. Negatif Faktörler.....	6
2.2.1. Teknoloji Tabanı ve Yeterlilik.....	6
2.2.2. Sertifikasyon alt yapısı.....	7
2.2.3. Sertifikasyon prosesi.....	7
2.2.4. Maliyet etkinlik analizi (CEA).....	7
 3. KAYNAK VE SERT LEHİM.....	 9
3.1. Kaynak.....	9
3.1.1. Kaynakla birleştirme.....	11
3.1.2. Füzyon kaynak yöntemleri.....	12
3.1.2.1. Oksiasetilen kaynağı.....	13
3.1.2.2. Gaz-tungsten ark kaynağı.....	15
3.1.2.3. Gaz metal ark kaynağı.....	18

3.1.2.4. Koruyuculu metal ark kaynağı.....	21
3.1.2.5. Plazma ark kaynağı.....	23
3.1.2.6. Elektron ışın kaynağı.....	29
3.1.2.7. Lazer ışın kaynağı.....	35
3.1.2.8. Füzyon kaynağında transfer verimi.....	38
3.2. Sert Lehim.....	40
3.2.1. Sert lehimin avantaj ve dezavantajları.....	41
3.2.2. Sert lehim prensipleri.....	43
3.2.3. Sert lehim yöntemleri.....	44
3.2.3.1. Şalumo lehim.....	45
3.2.3.2. Fırın lehim.....	45
3.2.3.3. İndüksiyon lehim.....	46
3.2.3.4. Daldırma lehim.....	47
3.2.3.5. Kızılötesi lehim.....	48
3.2.3.6. Difüzyon lehim.....	49
3.2.3.7. Diğer özel sert lehim yöntemleri.....	50
3.2.4. Uygulama alanları.....	51
3.3. HİBM’nde F110-GE-100/129 Motoruna Uygulanan Kaynak ve Sert Lehim İşlemleri.....	52
4. GELİŞMİŞ İŞLEME YÖNTEMLERİ.....	56
4.1. Elektrokimyasal İşleme (ECM).....	56
4.1.1. Temel prensipler.....	57
4.1.2. ECM’in avantaj ve dezavantajları.....	60
4.1.3. İşleme hızı.....	61
4.1.4. ECM’in uygulama alanları.....	63
4.1.4.1. Çapak alma.....	64
4.1.4.2. Delik delme.....	65
4.2. Elektriki Aşındırmayla İşleme (EDM).....	67
4.2.1. Temel Prensipler.....	69
4.2.2. EDM’in avantaj ve dezavantajları.....	75
4.2.3. İşleme hızı.....	76

4.2.4. Uygulama alanları.....	77
4.2.4.1. Delik delme.....	77
4.3. Elektrokimyasal Taşlama (ECG).....	80
4.3.1. Temel prensipler.....	81
4.3.2. ECG'nin uygulamada kullanımı.....	82
4.3.3. ECG'nin avantaj ve dezavantajları.....	84
4.3.4. İşleme hızı.....	85
4.3.5. Uygulama alanları.....	86
4.4. Lazer Işınıyla İşleme (LBM).....	87
4.4.1. Katı hal lazerleri.....	88
4.4.1.1. Nd-YAG lazeri.....	91
4.4.2. Lazerin malzemeler üzerindeki etkileri.....	93
4.4.2.1. Yansıma.....	94
4.4.2.2. Emme.....	94
4.4.2.3. Isı iletimi.....	95
4.4.2.4. Yüzeyin ergimesi.....	95
4.4.2.5. Buharlaştırma.....	96
4.4.3. Lazerle işleme uygulamaları.....	96
4.4.3.1. Delme.....	96
4.4.3.2. Kesme.....	100
4.4.3.3. Isıl işlem.....	102
4.5. HİBM'nde F110-GE-100/129 Motoruna Uygulanan Gelişmiş İşleme Yöntemleri.....	102
5. KORUYUCU KAPLAMALAR.....	106
5.1. Difüzyonlu Kaplamalar.....	108
5.1.1. Basit difüzyonlu kaplamalar.....	108
5.1.2. Geliştirilmiş difüzyonlu kaplamalar.....	109
5.2. MCrAlY Üst Yüzey Kaplamaları.....	110
5.3. Metalik-Seramik Kaplamalar.....	110
5.4. Termal Bariyer Kaplamalar.....	112
5.5. Termal Sprey Kaplamalar.....	117

5.5.1. Termal sprej kaplama yöntemleri ve uygulama alanları..	118
5.5.1.1. Alev püskürtme.....	119
5.5.1.2. Detonasyonla alev püskürtme.....	120
5.5.1.3. Ark sprej.....	121
5.5.1.4. Plazma sprej.....	122
5.6. HİBM’nde F110-GE-100/129 Motoruna Uygulanan Kaplama İşlemleri.....	124
6. DİĞER YENİLEME İŞLEMLERİ.....	129
6.1. Temizleme.....	129
6.2. Kumlama ve Bilye ile Dövme.....	130
6.3. Boyama.....	130
6.4. Isıl İşlem.....	131
7. SONUÇ.....	132
KAYNAKLAR.....	141

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
3.1. Kaynak oluşturmak için bir araya getirilen iki ideal ve gerçek malzeme.....	11
3.2. Füzyon kaynağındaki çeşitli mikro yapısal bölgeler.....	12
3.3. Oksiasetilen alevi.....	14
3.4. a) Tipik bir Oksi-yakıt şalumosunun temel elemanları b) Gaz karıştırıcısının kesit şekli	15
3.5. GTAW yönteminin elektriki montaj şeması.....	16
3.6. Bir GTAW şalumosu.....	16
3.7. GTAW'ın çeşitli çalışma modlarının özellikleri.....	17
3.8. Gaz metal ark kaynağı yöntemi.....	19
3.9. Çeşitli ergimiş metal transferi modları.....	21
3.10. Koruyuculu metal ark kaynağı yöntemi.....	22
3.11. Plazma ark kaynağı şalumosu.....	24
3.12. GTAW (a) ve PAW (b) yöntemlerinin karşılaştırması.....	25
3.13. a) Plazma oluşumunda transfer edilmemiş ark modu b) Plazma oluşumunda transfer edilmiş ark modu	26
3.14. a) Plazma ark kaynağındaki melt-in modu b) Plazma ark kaynağındaki keyhole modu.....	27
3.15. Plazma ark kaynağı uygulanmış HPT paleleri.....	29
3.16. Wentgate elektron ışın kaynağı makinesinin diyagramı.....	30
3.17. Lazer ışın kaynağı.....	36
3.18. Füzyon kaynak yöntemlerindeki transfer verimini etkileyen enerji kayıpları.....	39
3.19. Tipik bir fırın lehim sistemi.....	46
3.20. Tipik indüksiyon lehim bobinleri.....	46
3.21. Tipik bir daldırma lehim tertibatı.....	48
3.22. Kızılötesi lehim.....	49
3.23. HPT palesi.....	53
3.24. HPT nozul kanatçığı.....	53

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.25. Yanma odası (dome).....	53
3.26. Yanma odası (inner liner).....	54
3.27. EBW	54
3.28. LPT nozulu.....	55
3.29. LPT nozulu.....	55
3.30. Pal peteği conta (honeycomb seal).....	55
4.1. ECM için katot-takım ve anot-iş parçasının ilk (a) ve son (b) durumları.....	57
4.2. a) Küçük bir elektrokimyasal makine (500 A) b) Endüstriyel makinenin komponentleri	60
4.3. ECM ile çapak alma.....	64
4.4. Enine delinmiş delikte elektrokimyasal çapak alma işlemi.....	65
4.5. Elektrokimyasal delik delme işlemi.....	65
4.6. a) Sodyum nitrat elektrolitteki aşırı kazma b) Sodyum klorit elektrolitteki aşırı kazma.....	66
4.7. Kare kesitli katot ve açtığı kare kesitli delik.....	67
4.8. a) Elektrot ve iş parçasının ilk şekilleri b) Elektrot ve iş parçasının son şekilleri	68
4.9. Rahatlama (R-C) devresi.....	69
4.10. Kapasitör voltajının zamanla değişimi.....	70
4.11. a-1) EDM işleminin basamakları.....	75
4.12. EDM'in grafit elektrot ile özellikleri.....	77
4.13. İşleme hızının komponentin kalınlığı ile bağlantısı.....	79
4.14. Bir türbin palesi üzerinde EDM ile delinmiş soğutma delikleri.....	79
4.15. EDM ile işlenmiş çeşitli paleler.....	80
4.16. Elektrokimyasal taşlama.....	81
4.17. Lazer Fabry-Perot interferometresi.....	87
4.18. a) Sarmal flaş lambalı katı hal lazeri b) Düz flaş lambalı katı hal lazeri.....	88

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.19. Yakut lazer.....	89
4.20. a) Üç seviyeli (i) ve dört seviyeli (ii) lazer için emme ve yayılma b) Uyarılmadan önceki (i) ve uyarılmadan sonraki (ii) yayılmalar.....	90
4.21. Nd-YAG lazerinin optik şeması.....	92
4.22. Lazer ışının iş parçasıyla etkileşimi a) Emme ve ısınma, b) Ergime, c) Buharlaşma.....	93
4.23. Sadmeli lazer ile delinen bir deliğin derinliğinin çapı ile değişimi.....	97
4.24. Lazer spotunun yörüngesi.....	99
4.25. Lazer ile açılmış soğutma delikleri bulunan türbin kanatçığı ve palesi.....	100
4.26. HPT palesi üzerinde EDM ile açılmış soğutma delikleri.....	103
4.27. HPT nozul kanatçığı üzerinde EDM ile açılmış soğutma delikleri.....	103
4.28. ECG ile taşlanan HPT dış çemberi (HPT shroud).....	103
4.29. ECG ile taşlanan HPC contası (HPC air seal).....	104
4.30. Yanma odasına (combustion chamber dome) uygulanan EDM işlemi	104
4.31. EDM ile çürütülen LPT nozul kanatçıkları.....	105
4.32. ECG ile taşlanan bal peteği conta (honeycomb seal).....	105
4.33. YAG lazer tezgahı.....	105
5.1. Kirlenmenin etkisi.....	107
5.2. TBC’de sıcaklık dağılımı.....	113
5.3. TBC morfolojileri.....	114
5.4. Rolls-Royce RB212 motorunun yanma odası.....	116
5.5. Rolls-Royce RB212 motorunun türbin stator kanatçıkları.....	116
5.6. TBC’deki tipik yapraklı yapı.....	118
5.7. Alevli toz püskürtme yöntemi.....	119
5.8. Alevli tel püskürtme yöntemi.....	120
5.9. HVOF tabancası.....	121
5.10. Ark sprej yöntemi.....	122
5.11. Plazma sprej yöntemi.....	122
5.12. Türbin kanatçıkları üzerindeki plazma kaplanmış bölge.....	124

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.13. Kaplama işlemi görmüş bir bal peteği conta (honeycomb seal).....	124
5.14. Kaplama işlemi öncesi fan paleleri.....	125
5.15. Kaplama işleminden sonra monte edilmiş bir fan.....	125
5.16. HPC dönen contası (rotating air seal) üzerindeki kaplama.....	126
5.17. Kaplama işlemi sonrası monte edilmiş bir HPC.....	126
5.18. TBC işlemi görmüş bir HPT nozulu.....	127
5.19. Çıplak (sol) ve TBC ile kaplanmış (sağ) egzoz flapları.....	127
5.20. Kompresör ön dış conta (forward outer seal) üzerindeki borazon kaplama.....	128
5.21. Kaplama işlemi görmüş bir LPT nozulu.....	128
6.1. Ultrasonik temizlemedeki sıkıştırma (1) ve genişleme (2) kademeleri.	129
6.2. Atmosfer kontrollü bir ısıtma işlem fırını.....	131

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
3.1. LBW'nin diğer kaynak yöntemlerine göre enerji sarfiyatı ve verimi..	37
3.2. EBW ve LBW yöntemlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları.....	37
3.3. Tipik enerji transfer verimleri.....	39
3.4. Sert lehimin avantaj ve dezavantajları.....	43
4.1. Çeşitli metallerin ECM işlemlerinde kullanılan elektrolitler.....	58
4.2. Elektrokimyasal işlemedeki teorik işleme hızları.....	62
4.3. Elektrokimyasal taşlamadaki teorik işleme hızları.....	85
4.4. Katı hal lazerlerinin özellikleri.....	91
4.5. Lazer ışının normal geliş açısında metallerin yansıtıcılıkları.....	94
4.6. Çeşitli malzemeler için çeşitli derinliklere penetrasyon süreleri.....	95
4.7. Sabit ısı akışı altında metallerde yüzey ergimesinin başlaması için geçen teorik süreler.....	96
4.8. Lazer ile kesme verileri.....	101
5.1. SermeTel W-Class 4 kaplamaların tipik özellikleri	111
5.2. Process 5380'in özellikleri.....	112
5.3. Process 5380 DP'nin özellikleri.....	112
5.4. Isı oluşumu ve besleme malzemelerine göre TSC yöntemlerinin sınıflandırılması.....	118
5.5. TSC yöntemlerinin tipik parametreleri.....	119

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simge	Açıklama
Å	Angstrom (10^{-9} m)
δ	Açısal pozisyon (radyan)
$\delta\theta$	Işık demetinin saçılması (radyan)
λ	Dalgaboyu (m)
μm	Mikrometre (10^{-6} m)
+ve	Pozitif
-ve	Negatif
A	Amper, ECM’de çözünen iyonların atomik ağırlığı (mg)
A_A, A_B	A ve B elementlerinin çözünen iyonlarının atomik ağırlığı (mg)
C	Kapasitör
D	Çap
E	Potansiyel fark (Volt)
F	Faraday sabiti
I	Akım Şiddeti (Amper)
Hz	Herz
J	Joule
kHz	Kilo Herz
kJ	Kilo Joule
kV	Kilo Volt
mPa	Mili Pascal
Pa	Pascal
R	Direnç (Ohm)
V	Volt
W	Watt
X_A, X_B	Alaşım içinde %X miktarda bulunan A ve B elementleri
z	İyonların birleşme değeri
z_A, z_B	A ve B elementlerinin birleşme değeri

Kısaltma Açıklama

AC	Alternating Current - Alternatif Akım
ADH	Activated Diffusion Healing - Aktif Difüzyon İyileştirmesi
APS	Air Plasma Sprey - Hava Plazma Spreyi
AQAP	Allied Quality Assurance Procedures - Ortak Kalite Güvence Prosedürleri
ASPS	Argon Shielded Plasma Sprey - Argon Koruyuculu Plazma Spreyi
CEA	Cost Effectiveness Analysis - Maliyet Etkinlik Analizi
CF	Canadian Forces - Kanada Hava Kuvvetleri
CNC	Computer Numeric Control - Bilgisayarlı Nümerik Kontrol
CVD	Chemical Vapour Deposition - Kimyasal Buhar Birikimi
DC	Direct Current – Doğru Akım
DCEN	Direct Current Electrode Negative – Doğru Akım Negatif Elektrot
DCEP	Direct Current Electrode Positive - Doğru Akım Pozitif Elektrot
DCRP	Direct Current Reverse Polarity - Doğru Akım Ters Polarite
DCSP	Direct Current Straight Polarity - Doğru Akım Düz Polarite
EB-PVD	Electron Beam Physical Vapour Deposition – Elektron Işınıyla Fiziksel Buhar Birikimi
EBW	Electron Beam Welding – Elektron Işın Kaynağı
ECG	Electrochemical Grinding – Elektrokimyasal Taşlama
ECM	Electrochemical Machining – Elektrokimyasal İşleme
EDM	Electro Discharge Machining – Elektriki Aşındırmayla İşleme
EMS	Engine Monitoring System – Motor İzleme Sistemi
EN	Elektroless Nicel – Akımsız Nikel
EN	Electrode Negatif- Negatif Elektrot
EP	Electrode Positive - Pozitif Elektrot
FAA	Federal Aviation Administration – Federal Havacılık Dairesi
FMECA	Failure Modes, Effects and Criticality Analysis - Hasar Modları, Etkileri ve Kritiklik Analizi
FZ	Fussion Zone - Füzyon Bölgesi
GMAW	Gas Metal Arc Welding - Gaz Metal Ark Kaynağı
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding - Gaz Tungsten Ark Kaynağı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

HAZ	Heat Affected Zone - Isıdan Etkilenmiş Bölge
HCF	High Cycle Fatigue - Yüksek Çevrim Yorulması
HF	High Frequency - Yüksek Frekans
HIP	Hot Isostatic Press - Sıcak İzostatik Pres
HİBM	Hava İkmal Bakım Merkezi
HPC	High Pressure Compressor – Yüksek Basınç Kompresörü
HPT	High Pressure Turbine - Yüksek Basınç Türbini
HVOF	High Velocity Oxy Fuel - Yüksek Hızlı Oksi Yakıt
IECMS	In-flight Engine Condition Monitoring System - Uçuş Esnasında Motor Durum İzleme Sistemi
JAA	Joint Aviation Authorities - Birleşik Havacılık Otoriteleri
LBM	Laser Beam Machining - Lazer Işınıyla İşleme
LBW	Laser Beam Welding - Lazer Işınıyla Kaynak
LCC	Life Cycle Cost - Ömür Çevrim Maliyeti
LCF	Low Cycle Fatigue - Düşük Çevrim Yorulması
LPM	Liburdi Powder Metallurgies - Liburdi Toz Metalürjileri
LPSS	Low Pressure Plasma System - Alçak Basıncılı Plazma Sistemi
LPT	Low Pressure Turbine -Alçak Basınç Türbini
MIG	Metal Inert Gas - Metal Soy Gaz
MPPW	Micro Plasma Powder Welding - Mikro Plazma Toz Kaynağı
MSDRS	Maintenance Signal Data Record System – Bakım Sinyal Veri Kayıt Sistemi
NATO	North Atlantic Treaty Organisation - Kuzey Atlantik Güvenlik Paktı
NPV	Net Present Value – Net Mevcut Değer
OEM	Original Equipment Manufacturer - Orijinal Ekipman Üreticisi
PAW	Plasma Arc Welding - Plazma Ark Kaynağı
PWA	Pratt & Whitney Aircraft

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

PMZ	Partially Melted Zone - Kısmen Ergimiş Bölge
PTA	Plasma Transferred Arc - Plazmayla Transfer Edilmiş Ark
RMS	Root Mean Square – Ortalama Kare Kök
ROI	Return On Investment - Yatırıma Dönüş
SMAW	Shielded Metal Arc Welding – Koruyuculu Metal Ark Kaynağı
TAC	Total Accumulated Cycle – Toplam Birikmiş Çevrim
TBC	Thermal Barrier Coating - Termal Bariyer Kaplama
TBO	Time Between Overhauls - Revizyonlar Arası Süre
TEM	Transmission Electron Microscopy – Transmisyon Elektron Mikroskopisi
TIG	Tungsten Inert Gas - Tungsten Soy Gaz
TSC	Thermal Spray Coating - Termal Sprey Kaplama
VPPA	Variable Polarity Pulsed Arc - Değişken Polariteli Sadmeli Ark
YAG	Yttrium Aluminium Garnet - İtiryum Alüminyum Grena

1. GİRİŞ

Modern gaz türbinli motorların maliyeti, motor başına yıllık 50.000 \$'ı [1] aşan yeni yedek parça masrafları ile milyonlarca doları bulmaktadır. Bu maliyetin büyük bir kısmını türbin sıcak kısmındaki pahalı komponentlerin değişimi oluşturmaktadır. Ayrıca onarım ve revizyon masrafları tek başına yedek parça maliyetleri hariç, motor başına 100.000 \$'ı [1] aşmaktadır.

Bir uçağın Ömür Çevrim Maliyeti (LCC)'nin yaklaşık %30'u motorlara bağlanabilir ve parçanın değiştirilmesi yerine yenilenmesi ile önemli bir maliyet düşüşü sağlanabilir [1]. Bununla beraber yenileme işlemi görmüş komponentler kullanıma verilmeden önce uçuşa elverişlilik açısından kalifiye edilmelidir. Bunun nedeni yenileme işlemleri sonunda boyutların, titreşim karakteristiklerinin ve komponentlerin mekanik özelliklerinin değişebilmesidir.

Jet motorlarına uygulanan parça yenileme işlemlerini tanıtmadan önce bir revizyonun hangi aşamalardan oluştuğunu belirtmekte fayda vardır. Bir revizyon çevriminin ilk basamağı kabul kontroldür. Revizyon periyodunu (TBO) dolduran ya da herhangi bir hasar veya uymazlık sonunda revizyona alınan bir motora uygulanacak bakım seviyesi motor kayıt defterindeki bilgilere göre belirlenir. Kabul kontrol motorun fiziksel kontrolü ve kayıtlarının kontrolünü içerir. Motor sökülmeksizin bir takım fiber optik cihazlarla motor içinde hasara uğrama potansiyeline sahip parçalar görsel olarak kontrol edilir.

Daha sonra daha detaylı kontroller için (boyutsal ölçümler ve tahribatsız kontroller) motor sırasıyla alt asamblelere ve parçalara ayrılarak bir takım mekanik ve kimyasal temizleme işlemlerine tabi tutulur. Temizlenerek tahribatsız kontrollerden geçen motor parçalarının servis ve tamir limitlerinde olup olmadıkları kontrol edilir. Gerekli yenileme işlemleri bu sonuçlara göre belirlenir. Bu çalışmada revizyonun bu safhasında uygulanan yenileme işlemleri tanıtarak gelişmiş ve ileri teknolojiye sahip işlemler üzerinde durulmuştur.

Yenileme işlemleri sonucunda tekrar servise verilebilecek duruma gelen parçalar bir araya getirilerek alt asambleler oluşturulur. Daha sonra bu alt asambleler toplanarak motorun son montajı gerçekleşir. Revizyonu yapılan motor, üreticinin belirttiği çalışma limitlerinde ve performans seviyelerinde olup

olmadığının kontrolü için bremzelerde test edilir ve onay alan motorlar servise verilir.

Kullanım limitlerini aşan bir komponenti yenisi ile değiştirmek yerine bir takım yenileme işlemlerinden geçirerek onu tekrar kullanılabilir hale getirmek daha cazip görünmektedir. Bununla birlikte işletmenin yenileme işlemine karar vermeden önce bir takım pozitif ve negatif etkenleri göz önünde bulundurmasında yarar vardır. Bu nedenle çalışmanın ilk bölümünde parça yenileme/değiştirme karar faktörleri incelenmiştir.

Çalışmada yenileme işlemleri üç ana grupta toplanmıştır. Birinci grupta jet motorlarına uygulanan kaynak ve sert lehim işlemleri ele alınmıştır. Gaz kaynağı tekniklerinden oksiasetilen kaynağı, ark kaynağı tekniklerinden gaz-tungsten ark kaynağı, gaz-metal ark kaynağı, koruyuculu metal ark kaynağı ve plazma ark kaynağı, ışın kaynağı tekniklerinden de elektron ışın kaynağı ve lazer ışın kaynağı incelenmiş ve uygulama alanlarına örnekler verilmiştir.

İkinci grupta gelişmiş işleme yöntemlerinden elektrokimyasal işleme, elektriki aşındırmayla işleme, elektrokimyasal taşlama ve lazer ışınıyla işleme yöntemleri incelenerek uygulama alanlarına örnekler verilmiştir.

Üçüncü grupta da koruyucu kaplamalar ele alınarak difüzyonlu kaplamalar, MCrAlY üst yüzey kaplamaları, metalik-seramik kaplamalar, termal bariyer kaplamalar ve termal spreycaplamalar incelenmiş ve kullanım alanlarına örnekler verilmiştir.

Çalışmada bu gelişmiş yenileme işlemlerinin haricinde uygulanan diğer yardımcı işlemlerden temizleme, kumlama, boyama işlemleri ve ısı işlemleri de kısaca tanıtılmıştır.

Türk Hava Kuvvetleri envanterinde bulunan F-16 savaş uçaklarında kullanılan ve General Electric firması tarafından üretilen F110-GE-100/129 turbofan motorlarına, Eskişehir 1. Hava İkmal Bakım Merkezi Jet Revizyon Müdürlüğü'nde uygulanan yenileme işlemlerine örnekler verilmiştir.

2. PARÇA YENİLEME/DEĞİŞTİRME KARAR FAKTÖRLERİ

Bu bölümde Kanada Hava Kuvvetleri envanterinde bulunan CF-18 uçağında kullanılan F404-GE-400 motorları üzerinde yapılan bir araştırmanın sonuçları örnek alınarak yenileme/değiştirme karar faktörleri pozitif ve negatif faktörler olarak iki ana başlıkta incelenmiştir [2].

2.1. Pozitif Faktörler

2.1.1. Program maliyetlerinin azaltılması

Muhtemelen en açık yenileme/değiştirme karar faktörü program maliyetlerinin azalmasına bağlıdır. Örneğin Kanada Hava Kuvvetleri envanterinde bulunan CF-18 uçağında kullanılan F404-GE-400 motorları için yenileme proses gelişiminin bir ön şartı olarak tasarlanan yenileme maliyetinin yeni parça değişimi maliyetinin 1/3'ünden az olması ön görülmüştür [2]. Bu oran yenileme geliştirme çalışmalarının, program maliyetlerindeki en büyük azalışının sağlanabileceği alanlara yoğunlaşmasını sağlamak ve yenileme prosesi maliyetlerinin artışına olanak sağlayacak bir aralık sağlamak amacındadır. Bu amaç aynı zamanda tahmin edilebilen maliyet azalışının büyüklüğünü tanımlamakla beraber, askeri açıdan yenileme işlemlerinden çıkarılan kazançları ekonomik açıdan ele almak genelde zordur. Ticari bir havayolu gibi ana hedefi karını arttırmak olan bir işletmede uçağın mevcudiyeti (uçuşa hazır olması) ile ilgili 1 dolarlık bir değer bile kolayca belirlenebilir. Tam tersine askeri bir kurumda uçağın barış zamanında uçuşa hazır oluşu, tehdit durumuna oranla o kadar önemli değildir. Bununla birlikte, mevcut maliyet arttırıcılar yeterli bir şekilde anlaşıldığında askeri sektör için de yenileme işlemlerinden doğacak ekonomik kazançlar önem kazanacaktır. Amerikan Savunma Maliyet Etkinlik Analiz Bölümü yenileme işlemlerinin maliyet/ fayda analizi için mükemmel ve mevcut bir araçtır. Bu Maliyet Etkinlik Analizi (CEA) ya da eşdeğer bir prosedür hangi yenileme işlemlerinin ekonomik olarak arzu edildiğinin anlaşılması için bir ön şarttır [2].

2.1.2. Komponent servis ömrünün arttırılması

Genelde yenilenmiş bir komponentin, yeni bir komponentin kullanım ömrünün belli bir yüzdesi kadar bir ömrü olacağı kabul edilmesine rağmen yapılan araştırmalar yenilenmiş bir komponentin servis ömrünün orijinal OEM (Orijinal Ekipman Üreticisi) komponentininkinden daha uzun olabileceğini göstermektedir [2]. Yenileme işlemi görmüş bir komponentin bu arttırılmış servis ömrü beklentisini nasıl sağlayabileceğini örneklemek yerinde olacaktır.

F404-GE-400 motorunun Yüksek Basınç Türbin (HPT) kanatçık bölgesi hem MA754 kanatçığında hem de MM-509 platformu ya da bandında termal yorulma çatlaklarından şikayet etmektedir. Kanatçık ve platform çatlakları motor çalışmasının tipik askeri çevrimleri esnasındaki karmaşık termal ve gaz eğilme yüklerinden kaynaklanmaktadır. HPT için geliştirilen yenileme işlemi kullanım esnasında oluşan çatlakların seçilen ve optimize edilen sert lehim malzemesi ile doldurulması şeklinde uygulanan bir vakumlu difüzyon sert lehim yönteminden oluşur. OEM HPT nozul segmenti Codep-B1 alüminid kaplı bir platforma ve kaplanmamış profil veya kanatçık segmentlerine sahiptir. Kaplanmamış kanatçıklar çevrimsel oksidasyona ve termal yorulma çatlaklarına maruzdurlar. Bunlar oksitlerin yaprak yaprak dökülmesine ve bunun sonucunda da malzeme ve işlevselliğin kaybına neden olurlar. Metalürji bilimindeki gelişmeler ve hasar mekanizmalarının tam anlamıyla anlaşılması sayesinde profiller için koruyucu bir kaplama geliştirmek mümkün olmuştur. Bunun sonucu yenileme işlemi görmüş bir komponentin yeni HPT nozullarının iki katı bir servis ömrüne sahip olmasıdır. Fakat buna rağmen kaplama prosesinin yeni komponentlere uygulanması ekonomik olarak uygun değildir [2].

İkinci örnek yönlendirilmiş bir şekilde katılaştırılmış René 80 komponenti olan HPT palesidir. Bu komponentin ömür sınırlayıcı bölgesinin hücum kenarı olması ve ömür belirleme modunun da termal yorulma olması beklenmektedir. Bununla birlikte bu komponentte çoğunlukla erken kal edilmeye (beklenen tasarım ömrü olan 30.000 eşdeğer termal çevrimin küçük bir bölümünde) sonuçlanan tanecikler arası korozyon hasarı ve çatlağı görülmektedir. HPT palelerinin yenilenmesinde kullanılacak yöntem hasar değerlendirmesini içerecektir. HF iyon temizleme ve kaynakla tamir işlemini kaynak sonrası ısı

işlem ve bir parlatma işlemi takip eder. Uçtaki kaynak malzemesi, gaz akışıyla tanecikler arası sınır arasında bir ayırıcı yüzey oluşturur ve tanecikler arası korozyon için bir bariyer işlevi görür. Yakıcı ekipman (burner rig) testinde yenileme işlemi görmüş paleler için yeni komponentlerden çok daha fazla bir servis ömrü görülmüştür [2].

Klasik yorulma hasarına hitap eden son bir örnek fan palesidir. F404-GE-400 motorunun titanyum Ti-6Al-40V fan palelerinin Sıcak İzostatik Pres (HIP) gençleştirmesinin, o komponentin orijinal LCF ömrünün %80 'ini (muhafazakar bir tahmin) yeniden vereceği beklenmektedir. Bu tür yenileme zaman ömrünü doldurmuş fakat aerotermodinamik olarak işlevsel bir komponente orijinal malzeme performanslarının kazandırılması açısından en açık yenileme maliyet azaltışı örneğidir. HIP prosesi geliştirilerek uygulanmış fakat OEM'in pale tasarımını modifiye ederek LCF ömrünü 3 kat arttırması sonucunda iptal edilmiştir. Maalesef modifiye edilmiş tasarımın arızaları artan tasarım ömür beklentilerini karşılamamıştır [2].

2.1.3. Uçuş emniyetinin geliştirilmesi

Operasyonel yükleme ve kritik hasar modlarıyla ilgili ayrıntılı bilgi temelini oluşturulmasında, gaz türbinli motor kullanıcısı komponentlerin arızalarını önceden görme ve bu arızaların sonuçlarını anlama kabiliyetini geliştirmek zorunda kalacaktır. Örneğin CF programının bir parçası da CF18 motorları için bir Hasar Modları, Etkileri ve Kritiklik Analizi (FMECA) prosesinin geliştirilmesidir. FMECA sadece yenileme prosesi için ilk karar noktası değil, aynı zamanda filo aktiflerinin operasyonel yönetimi için gerekli bir araçtır. FMECA ilgili personelin beklenmedik arızaların sonuçlarını değerlendirmelerine ve uçuşa elverişlilikten ödün vermeksizin operasyonel sorumlulukların yerine getirilmesini sağlamak için gerekli en uygun yönetim hareketini belirlemelerine yardımcı olur.

2.1.4. İkmal güvenliği

Hem askeri hem de sivil işletmeler ekonomik nedenlerden dolayı yedek malzeme stoklarını en düşük seviyede tutmak istemektedirler. Eğer işletme parça

yenileme kabiliyetine sahip değilse uçakların uçuşa hazır bulunabilmesi tamamen yedek parça stokuna bağlıdır. Yedek parça ikmalindeki herhangi bir aksaklık ticari hava yolunu uçakların programlanan zamanlarda seferlerini yapamamalarından dolayı ekonomik yönden sarsacakken bir askeri hava kuvveti için bu, ülkenin ulusal güvenliğinin tehdit altına girmesi gibi çok daha vahim sonuçlar doğuracaktır.

2.1.5. Endüstriyel tabanın gelişmesi

Uçak, motor ve komponentlere yapılan büyük revizyon işlemlerinin genelde taşeron şirketlere yaptırıldığı göz önünde bulundurulduğunda ticari havayolları ya da askeri kuruluşların parça değiştirme yerine yenileme işlemlerini tercih etmesi ülke içindeki endüstriyel tabanı geliştirecektir. Çünkü bu taşeron işletmeler ancak yeterli talep olduğunda teknolojik yenileme işlemlerini tasarlayıp yürütecek ve kendilerini geliştireceklerdir.

2.2. Negatif Faktörler

2.2.1. Teknoloji Tabanı ve Yeterlilik

Yenileme/değiştirme opsiyonunun en temel ön şartı gaz türbini komponentlerine ait metalürjik prensiplerin anlaşılmasıdır. Gaz türbini parçalarının fiziksel özellikleri ve hasar modları motor boyunca çok değişkendir ve detaylı bir şekilde anlaşılmalıdır. Hasar modları ya aerotermodinamik performansı etkilemekte ya da bu komponentlerin fiziksel olarak arızalanmalarına neden olmaktadır. HCF ve LCF kompresör bölümündeki hasar modları arasında en çok rastlananlarken, yanma odasında basınç patlaması veya termal yorulma temel hasar modlarıdır. Buna rağmen en büyük tehdidin olduğu bölge sürünme, termal mekanik yorulma, erozyon ve korozyonun bir araya gelerek en ağır çalışma ortamını oluşturdıkları türbin modülüdür.

Yenileme/değiştirme opsiyonu ile ilgili ikinci yeterlilik alanı bu komponentlerin tasarım işlevlerini yerine getirdikleri gerçek çalışma ortamının anlaşılmasıyla ilgilidir. Bu bilgilerin çoğunluğu OEM tarafından sıkıca saklanan tescilli tasarım verileridir. Bununla birlikte tasarım varsayımları sıklıkla tüm çalışma aralığına yeterince hitap etmez. Bu yüzden servis deneyimini analiz etmek

gerekir. Bilgi tabanının bu kısmı ileri gösterge aletlerinin gelişimi, deneysel metotların gelişimi, arızalı komponentlerin mevcut hikayelerinin analizi, özel göstergeli motorlar ve uçuş testleri ve arıza sonrası analizlerle geliştirilebilir.

Filo ortalama servis yüklerinin analizi ayrıntılı bir yenileme/değiştirme kararını desteklemek için yeterli değildir. Ayrıca komponent ömür kullanımının tek tek gözlenmesi gerekir. Bireysel motor kullanımını izleme ve buna göre hasar birikimini anlama yeteneği olmaksızın arıza eğilimlerini yeterince anlamak ve hasarın temel nedenlerine hitap eden bir yenileme prosesi hazırlamak son derece zordur. Bu yüzden envanterdeki motorlar üzerinde detaylı bir veri toplama ve analiz programı kurulmalıdır. Bu analiz kabiliyetinin amacı motor kullanım ve sağlık izleme gereklerini sağlamak ve aynı zamanda hasar modu/operasyonel kullanım ilişkilerinin daha ayrıntılı anlaşılmasını mümkün kılmaktır. F-404-GE-400 motorlarındaki Bakım Sinyal Veri Kayıt Sistemi (MSDRS) ve Uçuş Esnasında Motor Durum İzleme Sistemi (In-flight Engine Condition Monitoring System-IECMS) ile F110-GE-100/129 motorlarındaki Motor İzleme Sistemi (EMS) veri tabanı oluşturulmasında kullanılan sistemlere örnek olarak verilebilir.

2.2.2. Sertifikasyon alt yapısı

Birçok işletici için uçuşa elverişlilikteki en büyük engel yenileme işlemi sonrasında ortaya çıkan tasarım ve işlev değişiklikleri için komponent ve tam ölçekli motor doğrulama test kolaylıklarının mevcudiyetidir.

2.2.3. Sertifikasyon prosesi

Yenileme işlemi görmüş komponentlerin uçuşa elverişlilik açısından sertifikalandırılmaları gerekir. Bunun için yenileme işlemini yapacak işletmenin ulusal havacılık otoritesi tarafından, eğer yapılan işlemin uluslararası geçerliliği isteniyorsa da FAA ya da JAA tarafından onaylanması gerekir. NATO ülkeleri arasında askeri standart AQAP'dır.

2.2.4. Maliyet etkinlik analizi (CEA)

Amerikan Savunma Bakanlığı ile endüstriyel ve akademik destekçileri tarafından bir Maliyet Etkinlik Analizi (CEA) yaklaşımı geliştirilmiştir [2]. Bu

CEA maliyet ve fayda takdirine uygun bir yaklaşımları tanımlamaktadır ve gaz türbini yenileme işlemlerinin gelişimi üzerindeki projelere uygulanabilir. Proses esasen bir yenileme işlemindeki her adımı kapsar ve bu adıma bağılı toplam maliyeti tanımlar. CEA girdileri mevcut çevreyi tanımlayan standart girdiler, yenileme işleminin uygulanmasından doğan bir kerelik değişimleri içine alan birleşme verileri ve mevcut bakım programlarını ve mevcut programsız söküm oranını yansıtan programlı/programsız girdiler olmak üzere üçe ayrılır [2]. CEA çıktıları dolar maliyeti ya da NPV, ROI gibi yatırım cinsinden tanımlanabilir. Bu CEA yazılımı sayesinde kritik fonksiyonları belirlemek ve bunlara hitap etmek ve dahası maliyetleri ya da faydaları optimize etmek için bir hassasiyet analizi yapılabilir. Bu yazılım tersine de çalışır yani, yakıt maliyetlerindeki artışlar ya da parçaların yokluğu gibi kuramsal olaylara maliyet açısından yaklaşılabilir.

İşletmeler içinde bulundukları çevreyi, misyonlarını ve tüm bu pozitif ve negatif etkenleri göz önünde bulundurarak parça yenileme işlemi yapacaklarına ya da parçayı yenisi ile değiştireceklerine sağlıklı bir şekilde karar verebilirler.

3. KAYNAK VE SERT LEHİM

Jet motorları oldukça yüksek basınç ve sıcaklıklarda son derece güç şartlarda çalışmaktadırlar. Çalışma esnasında parçalar kopabilir, servis limitlerinin altında aşınabilir ya da parçalarda çatlaklar oluşabilir. Parça yenileme işlemleri esnasında bu parçalar eski yapılarına ve boyutlarına tekrar geri getirilerek işlevlerini emniyetli bir şekilde yerine getirmeleri sağlanır. İki parçanın tekrar birleştirilmesi, aşınmış bölgelerin orijinal boyutlarına getirilmesi vb. işlemlerde kaynak ve sert lehim yöntemleri kullanılmaktadır.

Çalışmanın bu bölümünde jet motorlarında parça yenileme işlemleri esnasında sıklıkla kullanılan gelişmiş kaynak ve sert lehim yöntemleri incelenmiş ve uygulama alanlarına örnekler verilmiştir.

3.1. Kaynak

Kaynak, ara yüzey içinde primer atomik veya moleküler bağlantılar oluşturmak amacıyla ısı ya da basınç ya da her ikisinin birlikte uygulanmasıyla iki veya daha fazla aynı tipte ya da sınıftaki malzemenin birleştirilmesi işlemidir [3]. İşlem bir dolgu malzemesini gerektirebilir ya da gerektirmeyebilir.

Kaynak işlemi için gereken ısı ya da basınç miktarı oldukça değişkendir. Çok az veya hiç basınç gerekmeksizin zemin ya da baz malzemenin ergimesini sağlayacak miktarda ısı oluşturulabilir. Bu durumda işlem füzyon (ergime) kaynağı olarak adlandırılır [3-5]. Alternatif olarak çok az ya da hiç ısıtma olmaksızın makroskobik plastik deformasyona ya da mikroskobik plastik deformasyona ve/veya sürünmeye neden olabilecek yeterli basınç uygulanabilir. Her iki durumda da ergime ya da füzyona ihtiyaç duyulmaz. Birleşme yüzeylerindeki atomlar ya da moleküller arasında fiziksel temas sağlamak için sadece basınca ihtiyaç duyulur. Bu tür işlemlere katı-hal ya da füzyonsuz (ergime olmadan) kaynak adı verilir. Basıncın çok yüksek olduğu uygulamalar ise basınç kaynağı ismini alır. Katı-hal kaynağının özel bir biçimine difüzyon birleştirme denir ve bu yöntemde katı haldeki difüzyon kinetiğini hızlandırmak için çeşitli derecelerde uygun basınç ve sıcaklık kombinasyonları kullanılır [3-5].

Literatürde çok çeşitli kaynak sınıflandırmaları yapılmakla beraber en yaygın sınıflandırma kaynak işlemi esnasında ergime olup, olmamasına göre yapılan sınıflandırmadır. Füzyonlu ve füzyonsuz kaynak yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır [3-5]. Bu çalışmada füzyonlu kaynak yöntemlerinden jet motorlarının parça yenileme işlemlerinde kullanılanlar incelenecektir. Fakat öncesinde kaynakla birleştirmenin nasıl gerçekleştiğini kısa bir şekilde incelemekte yarar vardır.

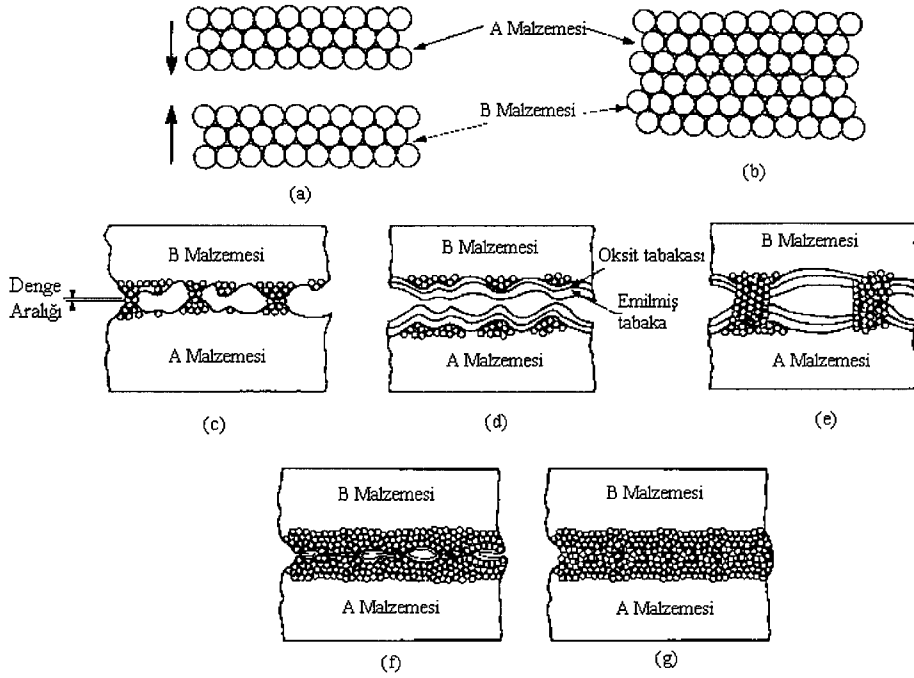
3.1.1. Kaynakla birleştirme

Bir ya da daha fazla atom birbirine yaklaştırıldıklarında pozitif yüklü çekirdek ile negatif yüklü elektronlar arasında bir elektrostatik çekim kuvveti doğar ve bu kuvvet atomlar arasındaki mesafe azaldıkça artar. Ayrıca atomlar birbirine yaklaştıkça potansiyel enerjileri de azalır. Bu mesafe birkaç atom çapı kadar bir değere küçüldüğünde atomların dış elektron kabukları diğerlerinin varlığını hissederek ve negatif yüklü elektron kabukları arasındaki itme kuvveti çekme kuvvetinden daha hızlı artar. Bu çekme ve itme kuvvetleri bir net kuvvet oluştururlar. Denge mesafesi ya da denge aralığı olarak adlandırılan belirli bir mesafede çekme ve itme kuvvetleri dengelenirler ve net kuvvet sıfır olur [3]. Bu denge aralığında net potansiyel enerji minimumdur, atomların bir araya gelmesi dengelenmiştir ve atomlar (veya iyonlar) birleşmiştir. Atomlar denge aralığında ve bir arada birleşmiş durumdayken tüm atomlar elektronları paylaşarak veya transfer ederek dengeli bir dış elektron konfigürasyonuna sahiptirler.

Kaynak için en temel esas atomların birleşme eğilimleridir. Kaynak işlemi için yapılması gereken atomları denge aralığına getirmektir. İki mükemmel düzgün yüzey denge aralığına yaklaştırıldıklarında ara yüzeydeki atomlar birleşirler ve iki parça birbirine kaynatılmış olur. Bu durumda hiçbir fiziksel ara yüzey kalıntısı oluşmaz ve bağlantıyı oluşturan malzemelerin yapısında bozulma olmaz. Şekil 3.1.a ve b’de ideal bir durum görülmektedir. Sonuçta oluşan kaynak, bağlama enerjisinden beklenen mukavemete sahiptir ve bağlantı verimi %100’dür.

Gerçekte iki malzeme asla mükemmel bir düzgünlüğe ve pürüzsüzlüğe sahip değildir. Bu yüzden ara yüzeyde denge aralığına ulaşmış tüm atomların kusursuz bir şekilde eşleşmesi mümkün değildir ve iki malzemeyi basit bir şekilde

bir araya getirerek kusursuz bir bağlantı asla oluşturulamaz. Gerçek malzemeler oldukça düzensiz yüzeylere sahiptir. Onlarca hatta yüzlerce atom yüksekliğindeki tepeler ya da çukurlar sadece birkaç noktada atomların denge aralığını oluşturacak şekilde temas etmelerine izin verirler. Şekil 3.1.c’de bu görülmektedir. Tipik olarak gerçek bir yüzeydeki her bir milyar atomdan sadece birisi bir bağ oluşturabilir ve bu yüzden teorik mukavemetin sadece bir milyarda biri kadar bir mukavemete ulaşılabilir [3]. Gerçek bir yüzey aslında iyi işlenmiş ve parlatılmış bir yüzeyi temsil etmektedir.



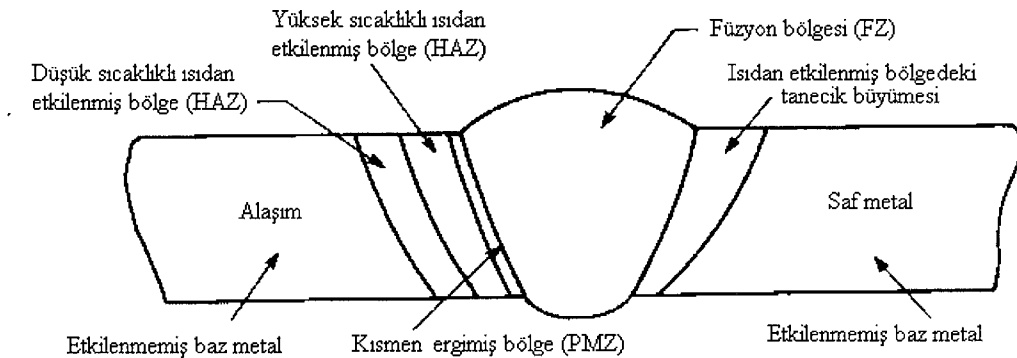
Şekil 3.1. Kaynak oluşturmak için bir araya getirilen iki ideal ve gerçek malzeme [3]

Bu durum, gerçek malzemelerde genelde rastlanan oksit tabakalarının ve soğurulmuş nem tabakalarının varlığı ile daha da kötüleşir. Şekil 3.1.d’de görüldüğü gibi birleşme yani kaynak bu durumlarda ancak oksit ve nem tabakalarının kırılarak temiz baz malzeme atomlarının denge aralığına getirilmesiyle gerçekleşebilir. Bu durumu iyileştirmek için gerçek malzemelerin yüzeylerinin temizlenerek hepsi olmasa da çoğu atom arasında geniş bir bölge boyunca yakın temas sağlanması gerekir (şekil 3.1.e). Bu da ısı ya da basınç uygulanarak gerçekleşebilir (şekil 3.1.f). Şekil 3.1.g’de neredeyse mükemmel bir kaynak görülmektedir.

3.1.2. Füzyon kaynak yöntemleri

Füzyon kaynağında birleştirilecek kenarlar ya da yüzeyler saf malzemeler için ergime sıcaklığına, alaşımlar için de sıvı hal sıcaklıklarının üzerinde bir sıcaklığa ısıtılırlar ve atomlar katılaşmadan sonra çok sayıda primer bağ oluşturmak için sıvı halde bir araya gelirler. Bazen birleşme aralığının tamamen doldurulması için ilave bir dolgu malzemesinin eritilerek katılması gerekebilir. Füzyon kaynak yöntemleri, birleştirmenin oluşturulmasında zeminlerin kısmen ergitilmesinin önemli bir rol üstlendiği yöntemlerdir.

Şekil 3.2’de bir saf ve bir alaşımlı kristalin metalik ya da seramik malzemede tipik bir füzyon kaynağı görülmektedir. Isıtmanın saf malzemenin sıcaklığının ergime noktasının üstüne çıkmasına ya da alaşımın sıcaklığının sıvı halin üstüne çıkmasına neden olduğu bölgede tamamen füzyon görülür ve bir “füzyon bölgesi” oluşur. Bu bölgenin dışında alaşımın sıcaklığı sıvı halin altında fakat katı halin üzerindedir ve “kısmen ergimiş bölge” olarak adlandırılır. Saf malzemeler bir sıcaklık aralığı yerine belirli ve tek bir sıcaklıkta ergidiklerinden kısmen ergimiş bölgeleri yoktur. Isı kaynağının merkez hattının ve sonuçta oluşan kaynağın uzağında sıcaklık daha düşüktür fakat katı hal geçişlerinden dolayı bazı mikro yapısal değişimlere neden olabilecek kadar yüksektir. Bu tür mikro yapısal değişimlerin görüldüğü bölgeye “ısıdan etkilenmiş bölge” adı verilir. Kaynağın ve ısı kaynağının merkez hattından daha uzak bir bölgede sıcaklık ciddi bir mikro yapısal değişikliğe neden olamayacak kadar düşüktür ve bu bölge “etkilenmemiş baz malzeme” olarak adlandırılır [3].



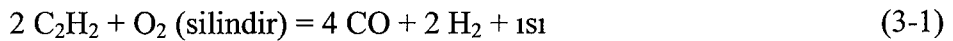
Şekil 3.2. Füzyon kaynağındaki çeşitli mikro yapısal bölgeler [3]

Füzyon kaynak teknikleri gaz kaynağı, ark kaynağı ve yüksek enerjili ışıın kaynağı olarak üç ana gruba ayrılabilir [3]. Genelde gaz kaynağında ısı kaynağı yakıt-gaz ile oksijenin egzotermik yanmasıdır. Doğal gaz, propan, bütan ve diğer hidrokarbon gazları ve hatta hidrojen kullanılmasına rağmen yakıt olarak asetilen gazının kullanıldığı oksiasetilen kaynağı yüksek alev sıcaklığından dolayı en yaygın kullanılan gaz kaynağı yöntemidir [3,6]. Isı kaynağı olarak bir elektrik arkı kullanan füzyon kaynak yöntemlerine ark kaynağı yöntemleri denir. Ark, kaynak elektrodu ve iş parçasından yayılan elektronlardan ve pozitif iyonlardan oluşur. Bu elektronlar ve pozitif iyonlar kaynak ve iş parçası arasındaki potansiyel fark (voltaj) tarafından hızlandırılırlar ve zıt yüklü eleman ile çarpıştıklarında kinetik enerjilerini ısıya dönüştürürler. Yüksek enerjili ışıın kaynağında ise ısı kaynağı olarak çok yüksek yoğunluklu ışıın kullanılır. Elektronların (EBW) ya da fotonların (LBW) iş parçasına çarpması sonucunda sahip oldukları kinetik enerji ısı enerjisine dönüşür ve iş parçasının ergimesine ya da buharlaşmasına neden olur.

Bu çalışmada gaz kaynağı tekniklerinden oksiasetilen kaynağı, ark kaynağı tekniklerinden gaz-tungsten ark kaynağı, gaz-metal ark kaynağı, koruyuculu metal ark kaynağı ve plazma ark kaynağı, ışıın kaynağı tekniklerinden de elektron ışıın kaynağı ve lazer ışıın kaynağı incelenmiş ve uygulama örnekleri verilmiştir.

3.1.2.1. Oksiasetilen kaynağı

Oksiasetilen kaynağı zeminlerin ve dolgu malzemesinin ergitilmesi için gerekli ısıyı iki kademeli bir yanma ile sağlar. Primer yanma olarak bilinen ilk kademede asetilen yakıt-gazı basınçlı bir gaz silindirinden tedarik edilen oksijenle kısmen reaksiyona girerek karbonmonoksit ve hidrojen oluşturur:



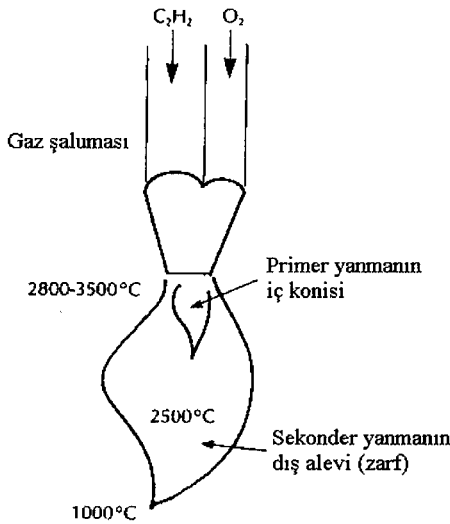
Bu reaksiyon egzotermiktir ve asetilenin oksijen içinde tamamen yanmasıyla oluşturulan toplam ısıнын 2/3'ünden [3] sorumludur. Primer yanmadan hemen sonra oluşan ve sekonder yanma olarak bilinen ikinci kademede asetilenin kısmen yanması sonucu ortaya çıkan karbonmonoksit havadaki oksijenle reaksiyona

girerek karbondioksit oluşturur. Bu esnada primer yanma sonucu ortaya çıkan hidrojen de havadaki oksijenle reaksiyona girerek su oluşturur.



Bu reaksiyonlar da egzotermiktir ve asetilenin tamamen yakılmasıyla elde edilen toplam ısının 1/3'ünden sorumludur.

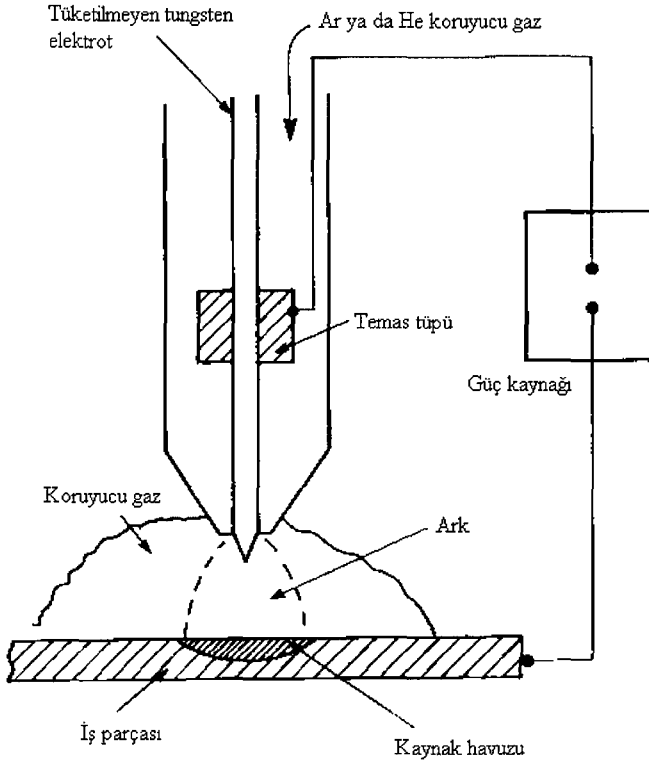
Gerçek primer ve sekonder yanma reaksiyonları bir oksijen-asetilen şalumosunun gaz alevinde iki bölgede oluşur (şekil 3.3). Primer yanma iç konide, sekonder yanma da dış alevde oluşur. İç koni kaynak için gerekli ısıyı oluştururken dış alev ısıtılmış ve ergimiş metalin oksitlenmesini önlemek için kaynak bölgesi etrafında bir maske oluşturarak atmosferden korur.



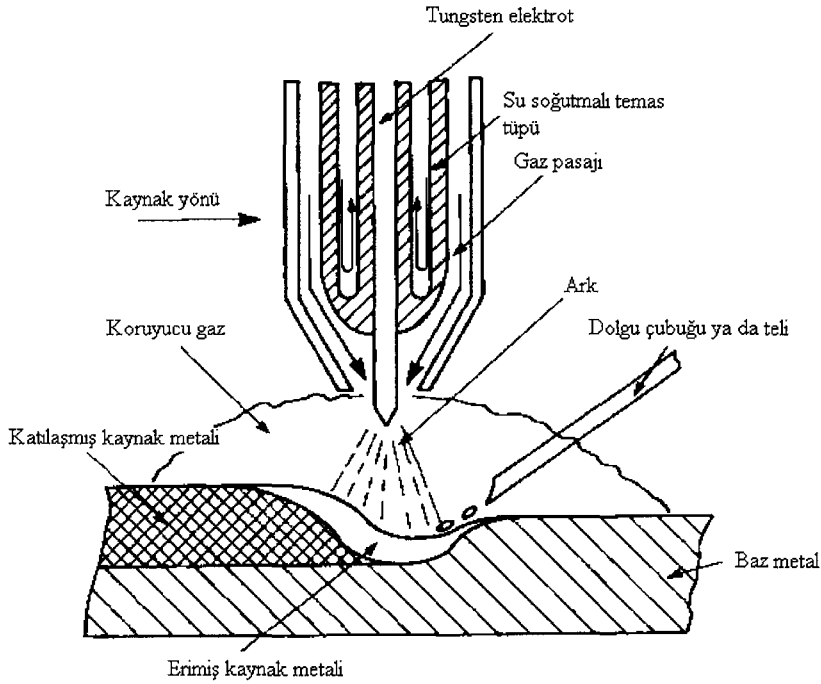
Şekil 3.3. Oksiasetilen alevi [3]

Oksiasetilen gaz kaynağı basit, oldukça portatif ve pahalı ekipman gerektirmeyen bir yöntemdir. Ekipman oksijen ve asetilen gazlarını barındıran basınçlı silindirlerden, basınç ve akış hızını kontrol eden gaz regülatörlerinden, yanma için gazları karıştıran bir şalumodan ve gazları silindirlerden şalumoya taşıyan hortumlardan oluşur. Şekil 3.4'de tipik bir şalumo görülmektedir.

Oksiasetilen kaynağında enerji kaynağı sınırlı olduğundan kaynak yavaştır ve kaynağın doğrusal uzunluğu başına düşen toplam ısı girdisi yüksektir. Yöntemin özellikleri kaynağı koruyan maske miktarını sınırlar. Bu yüzden titanyum gibi daha reaktif metallerin kaynağı genelde imkansızdır. Jet



Şekil 3.5. GTAW yönteminin elektriki montaj şeması [3]



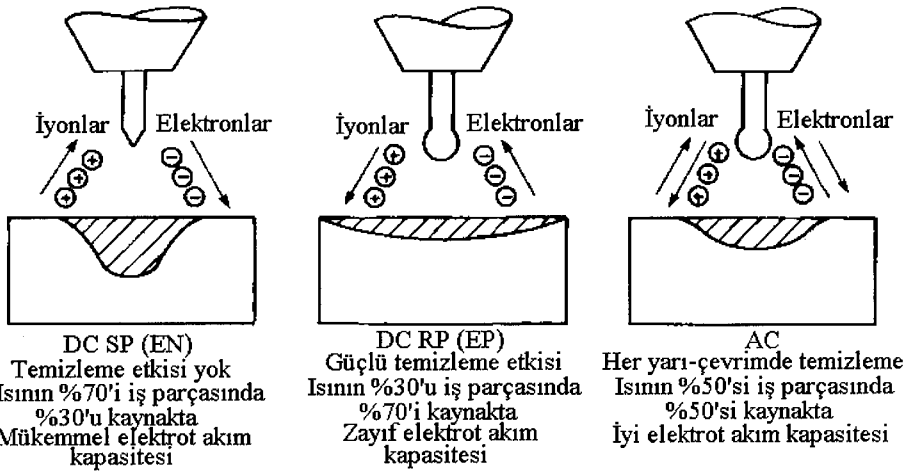
Şekil 3.6. Bir GTAW şalimosu [3]

DCSP’de elektronlar tungsten elektrottan yayılırlar ve ark içinde hareket ederlerken çok yüksek hızlara ve kinetik enerjilere ulaşırlar. Bu yüksek enerjili elektronlar iş parçasına çarparak kinetik enerjilerini bırakırlar ve iş parçası üzerinde büyük bir ısı oluştururlar. Bu nedenle DCSP derine nüfuz eden dar

kaynaklar oluşturur, fakat iş parçasına ısı girişi çok yüksektir. Arkıtan elde edilen net ısıнын yaklaşık 2/3'ü iş parçasına geçer [3]. İş parçasına olan yüksek ısı girişi; istenen kaynak penetrasyonu, istenen kaynak genişliği, iş parçası kütlesi, iş parçasının ısı iletkenliği, ısıdan kaynaklanan kusurlara karşı hassasiyet, şekil değiştirme ve birikmiş gerilme gibi etkenler gözönünde bulundurulduğunda bazen istenen bazen de istenmeyen bir olaydır.

Diğer yandan DCRP'de elektronların ısıtma etkisi iş parçasından ziyade tungsten elektrot üzerindedir. Bu yüzden daha geniş, su soğutmalı elektrot tutucuları gerekir. Derin olmayan, yüzeysel kaynaklar üretir ve iş parçasına ısı girişi düşük tutulabilir. Bu çalışma modu ince bölgelerin ya da ısıya hassas metal ve alaşımların kaynağı için daha uygundur. Bu mod ayrıca, yüzeye çarparak oksit tabakasını kaldıran ve böylece yüzeyi temizleyen büyük pozitif iyonlar sayesinde bir temizleme (fırçalama) etkisine sahiptir. Bu yüzden bu mod alüminyum ve magnezyum gibi kolayca oksitlenen metal ve alaşımların kaynağında tercih edilir.

DCSP modu DCRP modundan çok daha yaygındır. Fakat alternatif akım kullanan bir üçüncü mod daha vardır. Bu mod uygun DC periyotları esnasında her iki DC modun bazı özelliklerini verebilir. Fakat düz polarite yarı periyoduna biraz eğilimi vardır. Bu yarı periyot boyunca daha küçük ve daha sıcak elektrottan (iş parçası daha büyük ve daha soğuktur) yayılan ekstra elektronlar yüzünden akım daha yüksektir. AC modunda çok daha iyi bir penetrasyon bir miktar oksit temizleme etkisiyle beraber elde edilir. Şekil 3.7'de GTAW yönteminin çeşitli akım veya çalışma modlarının özellikleri özetlenmiştir [3].



Şekil 3.7. GTAW'nin çeşitli çalışma modlarının özellikleri [3]

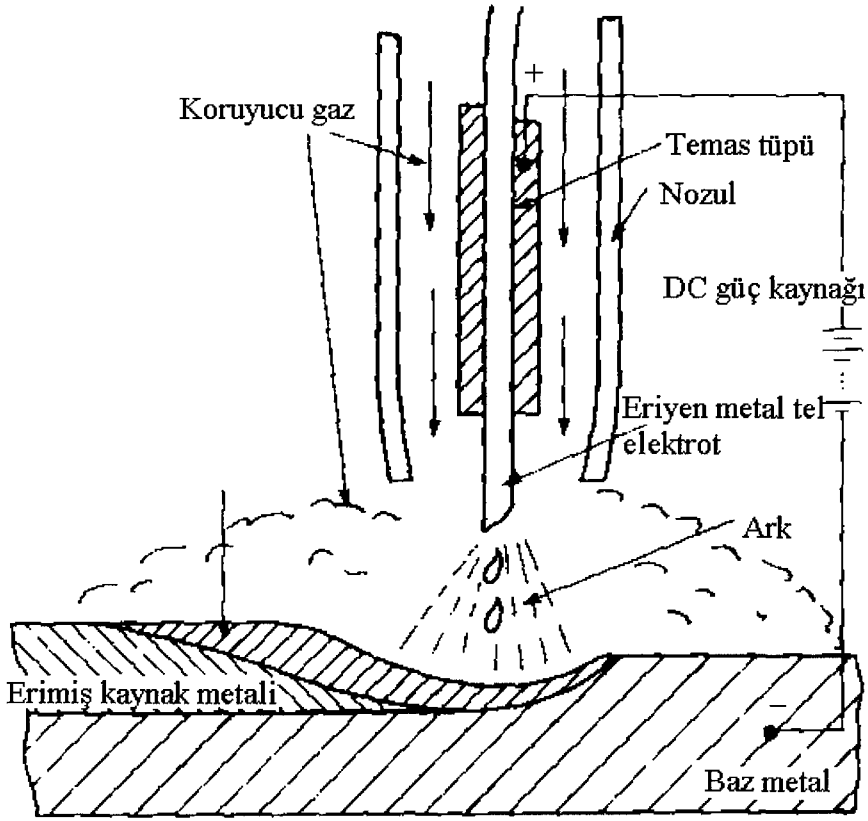
Tungsten elektrotların elektron yayımı, bazen tungstene %1-2 toryum oksit ya da seryum oksit katılarak artırılabilir [3]. Bu ilave elektrotun akım taşıma kapasitesini iyileştirir, lokal elektrot ergimesinin sonucunda görülen kaynağın birikmesi olayını azaltır ve arkın daha kolay başlatılmasını sağlar.

GTAW metodunda koruyucu olarak hem argon hem de helyum kullanılabilir. Fakat argon daha ağır olduğundan ve iş parçası üzerinde kalabildiğinden daha iyi bir koruma sağlar. Gereken iyonlaşma potansiyeli helyumdan daha düşük olduğundan arkın başlatılması daha kolaydır. Helyumun avantajı ise daha sıcak ark oluşturmastır [3,6,7].

Özet olarak GTAW metodu doğal düşük ısı girişinden dolayı ince kısımların kaynağı için elverişlidir. Diğer kaynak yöntemlerinin birçoğuna göre zemin tarafından kaynak dolgu seyreltilmesinin (çözülmemiş zemin ile dolgu malzemesinin birbirine karışması) daha iyi kontrol edilmesini sağlar ve çok temiz bir yöntemdir. En büyük sınırlayıcı düşük dolgu hızıdır. Fakat dolgu telinin elektrik devresi içine elektrottan daha düşük bir potansiyelde alınarak elektrikle ısıtılmasıyla bu sorun çözülebilir.

3.1.2.3. Gaz metal ark kaynağı

Gaz metal ark kaynağı (GMAW) yöntemi metal soy gaz ya da MIG kaynağı olarak da bilinir [3,6,7]. GMAW yönteminde sürekli eriyen bir metal tel elektrot ve dışarıdan tedarik edilen bir koruyucu gaz kullanılır. Şekil 3.8’de GMAW yöntemi şematik olarak görülmektedir. Eriyen metal tel elektrot kaynak bağlantısına tüm dolguyu sağlar. Hariçten tedarik edilen koruyucu gazın GMAW yönteminde iki rolü vardır. İlk olarak arkı ve soğumaya çalışan erimiş metali korur. İkinci olarak da iyonlaşma üzerindeki etkisi ile istenen ark özelliklerini sağlar. Kaynatılacak olan metalin reaktivitesine, birleştirmenin tasarımına ve istenen özel ark özelliklerine bağlı olarak argon, helyum, karbondioksit, hidrojen ve nadiren oksijen gibi çeşitli gazlar kullanılabilir. Ayrıca şekil 3.8’de gösterildiği gibi çeşitli güç kaynakları bağlanarak kullanılabilir. Özel tele ve erimiş metal transferinin istenen moduna bağlı olarak DCSP (DCEN) ya da DCRP (DCEP) modları kullanılabilir.



Şekil 3.8. Gaz metal ark kaynağı yöntemi [3]

GMAW'ın belirgin bir avantajı eriyen metal tel elektrottan ergimiş metal transferi modunun koruyucu gaz bileşimi, güç kaynağı tipi, elektrot tipi ve şekli, ark akımı ve voltajının bir kombinasyonu ile değiştirilebilmesi ve kontrol edilebilmesidir. Sprey, katı damla ve kısa devre modları olmak üzere en çok kullanılan üç metal transfer modu vardır. Ayrıca ergimiş metal transferi moduna özel olarak bağlı olmayan bir sadmeli (pulsed) ark modu ya da sadmeli akım modu da mevcuttur [3].

Sprey transfer modu, eriyen metal elektrottan iş parçasına saniyede birkaç yüz kere ince, kesikli, erimiş parçacık ya da damlaların aksel transferi şeklinde tanımlanabilir [3]. Metal transferi çok kararlı ve doğrultulmuştur (tevcihli). Esasen kaynak çamuru (eriyen metal elektrottan kaynak havuzu yerine iş parçasına dökülen atık erimiş dolgu metali) oluşmaz. Sprey transfer modunda yüksek voltaj ve amperde doğru akım pozitif elektrot (DC+) ile kaynak yapılır. Alüminyum, titanyum ve magnezyum gibi reaktif metallerin kaynağında genelde argon ya da argon-helyum karışımları kullanılırken, demir içeren alaşımların kaynağında daha iyi ve düzenli bir kontur vermek için genelde düşük miktarlarda

karbondioksit (%20) ya da oksijen (%2) ilave edilir (kaynak konturu kaynağın katılaştırmış üst kısmı ya da üst kaynak kordonudur).

Sprey transfer modundaki yüksek ark enerjisi ve ısı ince levha şeklindeki metallerin birleştirilmesinde etkinliği sınırlar, fakat güçlü doğrultulmuş (tevcihli) sprej pozisyon dışı (dikey olarak yukarı ya da aşağı doğru ya da tepe üstü) kaynaklar için uygundur.

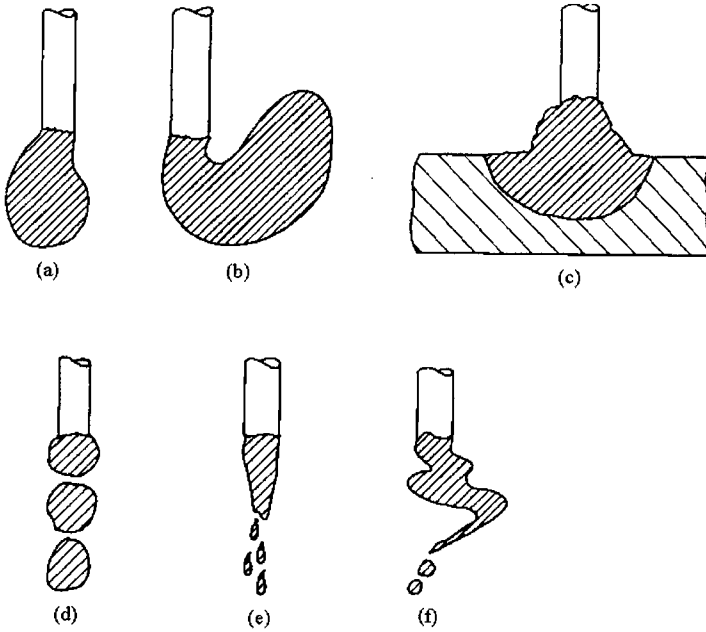
Katı damla transferi eriyen metal elektrodun ucunda oluşan büyük erimiş metal damlaların yer çekimi ve/veya ark kuvvetleri tarafından iş parçasına çekilmesi olarak tanımlanır [3]. Sprey transferle karşılaştırıldığında kaynak çamuru oldukça büyüktür. Koruma için argon ya da argon-helyum kullanıldığında bu moda ulaşmak için kaynak akımı düşük tutulmalıdır. Bu modda çalışmak istenildiğinde genelde karbondioksit bakımından zengin gazlar kullanılır.

Serbest düşme modları olarak bilinen sprej ve katı damla modlarından farklı olarak kısa devre modunda kaynak akımları ve voltajları düşük tutulur. Eriyen metal elektrodun ucunda yavaşça biçimlenen eriyik damlaları periyodik olarak kaynak havuzuna dokundurularak yüzey gerilme kuvvetleri sayesinde elektrottan ayrılmaları sağlanır. Bu kısa devre saniyede 50'den daha fazla bir hızda gerçekleşir ve özel güç kaynaklarını gerektirir [3]. Bu mod için gerekli düşük akımlar ince kesitlerin kaynağını mümkün kılar. Dikey ve tepe üstü kaynakları, erimiş metalin temas ile doğrudan transfer edilmesi sayesinde kolaydır. Kaynak çamuru bu transfer modunda en aza indirilmiştir.

Kaynak esnasında sabit akımlar yerine arkı devam ettiren düşük seviyeli bir sabit akımın üstüne kesik kesik (sürekli) yüksek genlik sadmeleri koymak mümkündür. Buna sadmeli (pulsed) akım ya da sadmeli ark modu adı verilir [3]. Buradaki mod ergimiş metal transferi modu değil akım modudur. Bu teknik sprej transferinin, yüksek genlik sadmeleri esnasında oldukça düşük akım seviyelerinde sağlanmasına izin verir. Argon bakımından zengin gazlar esastır ve programlanabilir güç kaynaklarına ihtiyaç duyulur. Bunun yanında bir takım avantajlar da elde edilir. Nispeten büyük çaplı elektrotlar hem ince hem de kalın kesitlerin kaynağında yatay, dikey ve baş üstü pozisyonlarında kullanılabilir.

Katı damla, kısa devre ve sadmeli ark transfer modları genelde doğru akım negatif elektrot (DC-) çalışma modunu kullanırken, sprej transfer modu

genelde doğru akım pozitif elektrot (DC+) çalışma modunu kullanır. Şekil 3.9’da çeşitli metal transferi modları görülmektedir.



Şekil 3.9. Çeşitli ergimiş metal transferi modları a) katı damla, b) ters katı damla, c) kısa devre, d) projeksiyonlu sprej, e) akıntılı sprej, f) dönen sprej [3]

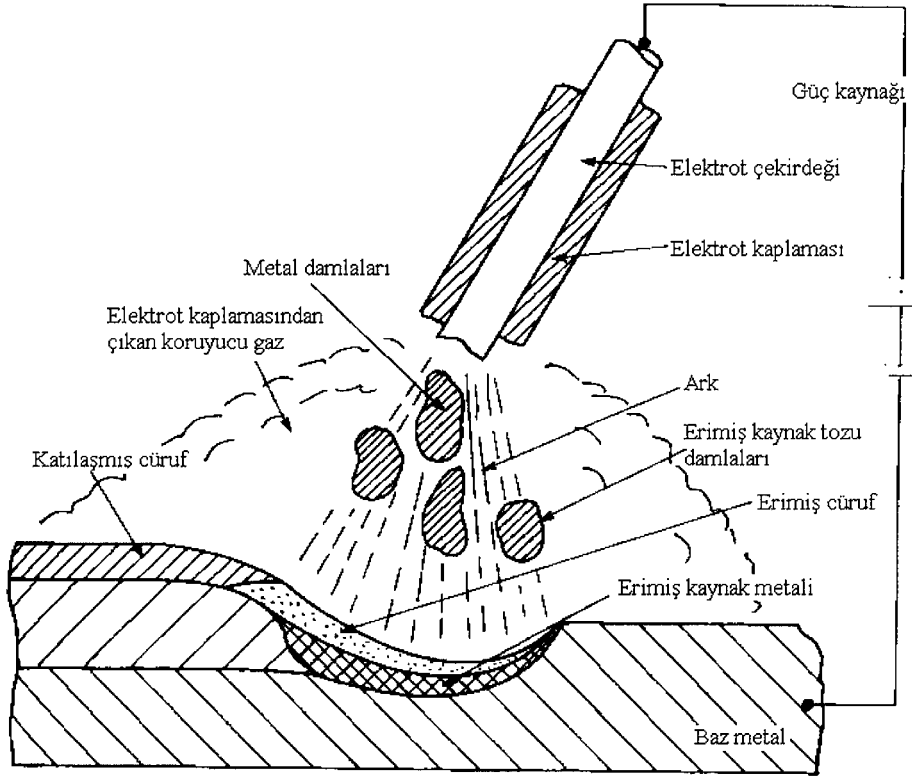
Özet olarak GMAW metodu esneklik ve çok yönlülük sağlar, kolayca otomatik hale getirilebilir, SMAW yöntemine göre daha az ustalık gerektirir ve yüksek birikim oranına (saatte 5-20 kg) ve verime (%90) sahiptir. Yöntemin en büyük kusuru tipik olarak ihtiyaç duyulan güç kaynaklarının (bunlar sabit voltajlı güç kaynaklarıdır) pahalı olmasıdır [3].

3.1.2.4. Koruyuculu metal ark kaynağı

Koruyuculu metal ark kaynağı (SMAW) yöntemi çubuk kaynağı olarak da bilinir [3,6]. Şekil 3.10’da görüldüğü gibi metalin birleşmesi kaynak tozuyla kaplanmış, süreksiz, eriyen metal (ya da çubuk) elektrot ile kaynak yapılan ana metalin yüzeyi arasında oluşan elektrik arkının oluşturduğu ısı ile sağlanır. Elektrodun çekirdek teli sabit akımlı bir güç kaynağından gelen elektrik akımını arka iletir ve birleştirme için gerekli dolgu metalinin büyük bir kısmını tedarik eder. Ark ısısının bir kısmı iletim yoluyla elektroda geçer ve kaynak gücünün bir kısmı da $I^2 R$ ısısı şeklinde kaybolur.

Bir SMAW elektrodu üzerindeki kaplama ya da kaynak tozunun birçok işlevi vardır. İlk önce kaynağın erimiş metalini havadan korumak için gaz

şeklinde bir maske oluşturur. Bu koruyucu gaz kaplamanın ayrışmasıyla oluşur. Kaplama; H_2 , CO , H_2O ve CO_2 üreten selüloz olabilir, %40'a kadar H_2 üreten doğal sagenit (TiO_2) olabilir ya da CO_2 ve CaO cürufu üreten ve çok az ya da hiç H_2 üretmeyen ve bu yüzden düşük hidrojen tipleri olarak bilinen kireçtaşı ($CaCO_3$) olabilir [3]. Farklı tipler hidrojenin tahammül edilebileceği ya da edilemeyeceği farklı uygulamalar için seçilir.



Şekil 3.10. Koruyuculu metal ark kaynağı yöntemi [3]

İkinci olarak kaplama, ergimiş metal bileşikleri şeklinde oksijen gidericileri (deoksidizer) ve eritici veya indirgeyici maddeleri içerir. Buradaki amaç tıpkı arıtma işleminde olduğu gibi ergimiş kaynak metalinin oksijeninin veya nitratinin giderilmesi ve temizlenmesidir. Kaynak tozundan oluşan cüruf bir kere katılaştıktan sonra, daha henüz katılaşmış fakat hala sıcak ve reaktif olan kaynak yapılmış metali oksidasyondan korur. Ayrıca erimiş kaynak metalinin içinde katılaşabileceği bir kabuk ya da kalıp oluşturarak pozisyon harici kaynak yapılmasına yardımcı olur (Pozisyon harici kaynak, iş parçasının yatay bir düzlemde olduğu ve ergimiş metal transferine yardımcı olmak için yer çekimi kuvvetinin kullanıldığı pozisyonun haricinde bir konumda yapılan kaynaktır [3]).

Üçüncü olarak kaplama, kolayca iyonlaşabilen bileşikler (potasyum oksalat ya da lityum karbonat) şeklinde ark dengeleyicileri içerir [3]. Bir iyon ve elektron kaynağı sağlayıp akımın iletilmesine yardımcı olarak arkın başlatılmasına, sürekli ve kararlı tutulmasına yardımcı olur. Son olarak kaplama, kaynak için alaşım elementleri (halita elemanları) veya tanecik arıtıcı ve/veya metal dolgu maddesi sağlar. Alaşım elementleri kaynağın kompozisyonuna ve/veya mikro yapısına ulaşmaya ve kontrol etmeye yardımcı olurken ikincisi dolgu metalinin birikim hızını artırır.

SMAW, kaplama tasarımına bağlı olarak hem doğru akımlı (DC) güç kaynaklarıyla (elektrot pozitif ya da negatif) hem de alternatif akımlı (AC) güç kaynaklarıyla çalıştırılabilir. Tipik olarak akımlar 10-30 Volt'da, geniş ölçüde elektrot çapına bağlı olarak 50-300 Amper arasında değişir ve saatte 1-10 kg'lık bir birikim hızına sahiptir. Ark sıcaklığı 5500° C'nin üzerindedir [3,6].

SMAW'ın avantajları basit olması, portatif olması, pahalı olmayan ekipman (güç kaynağı, elektrot tutucu ve kablolar) gerektirmesidir. Yöntem çok yönlüdür. Fabrikasyon, montaj, tamir ya da bakım esnasında birleştirme, orijinal boyutlara getirme veya aşınma direncinin artırılması işlemlerinde kullanılabilir. Yöntemin kusurları ise sınırlı koruma sağlaması ve sınırlı birikim hızlarına sahip olmasıdır. Otomatik yerine manuel teknikler tercih edilir. SMAW'da en iyi sonuçları almak için vasat bir operatör yeteneği yeterlidir.

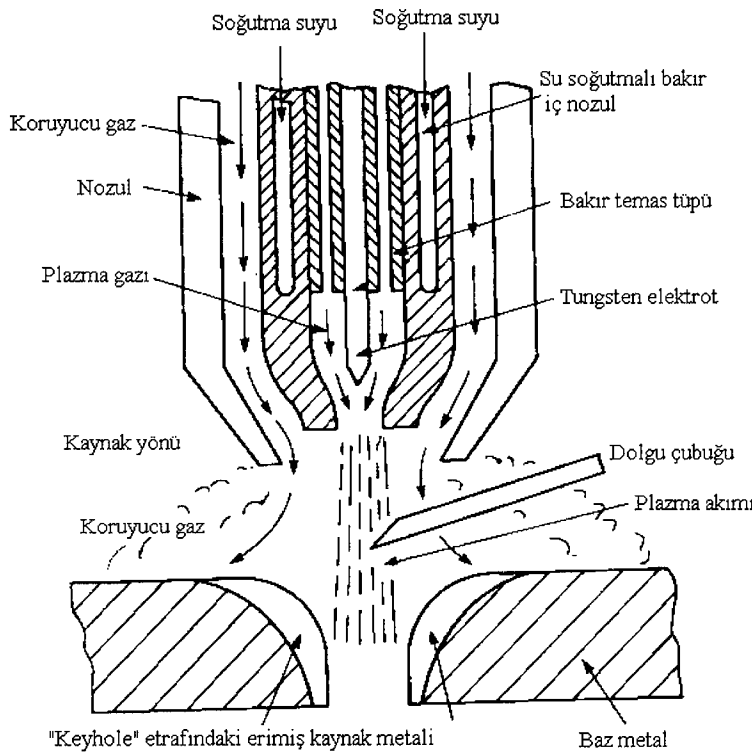
3.1.2.5. Plazma ark kaynağı

Gaz türbinli motorlarında kullanılan komponentlerin daha yüksek mukavemetli süper alaşımlarla imal edilmeleri ve buna bağlı olarak daha sağlam, oksitlenmeye karşı daha dirençli kaynak dolgu alaşımlarına olan ihtiyaç kaynak tamirlerinin yapılmasını müthiş derecede zorlaştırmıştır. Bunun sonucu olarak bir çok kompresör ve türbin komponentini kaynak yapma yeteneğine sahip plazma sistemleri geliştirilmiştir.

Plazma ark kaynağı (PAW) iş parçasına ark oluşturmak için tüketilmeyen bir tungsten elektrot kullanması bakımından gaz tungsten ark kaynağına benzer. Farklı olarak plazma ark kaynağında, Şekil 3.11'de görülen kaynak şalimosunun

nozulundaki bir delikteki soy gazın toplayıcı etkisi arkı daraltır ve bu sayede GTAW yöntemine göre bir çok avantajlar sağlar:

- Daha büyük enerji konsantrasyonu sayesinde iş parçasındaki çarpılma en aza indirilmiş ve ısıdan etkilenmiş bölge (HAZ) daraltılmıştır.
- Arkın sahip olduğu yüksek güç yoğunluğu ve yüksek gaz hızı sayesinde kalın kesitlerin kaynağı mümkündür.
- Bir pilot ark yardımıyla GTAW yöntemlerinde karşılaşılan yüksek frekanslı start sorunu çözülmüştür.
- Yüksek kaynak hızları elde edilebilir.
- Sadmeli akım tekniği kullanılarak penetrasyon daha iyi kontrol edilebilir.
- Tungsten elektrodun kazara iş parçasına dokundurulması mümkün olmadığından daha temiz kaynaklar üretilebilir [3,8].

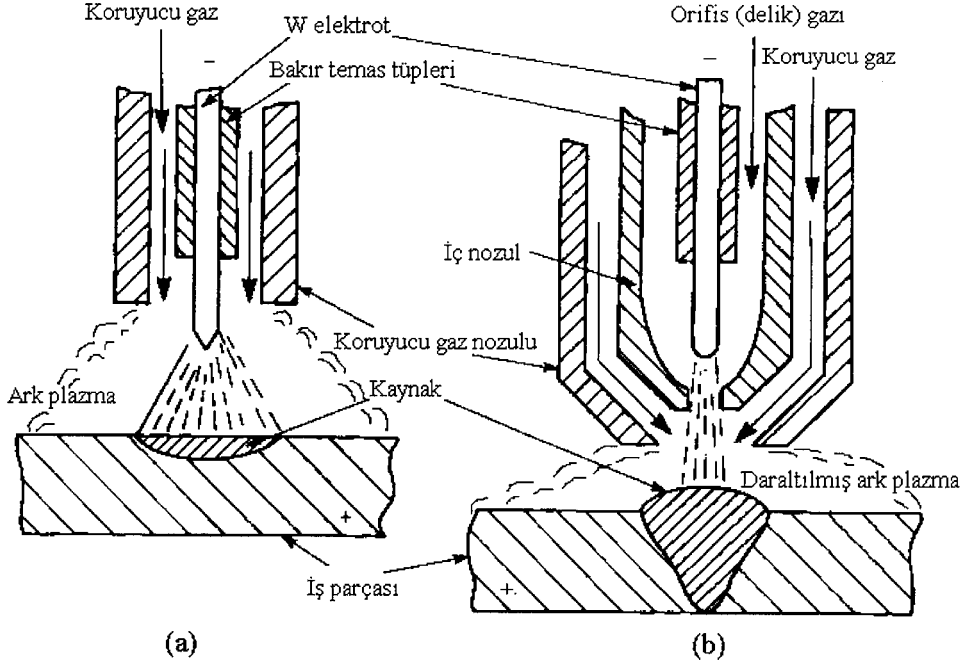


Şekil 3.11. Plazma ark kaynağı şalumosu [3]

Şekil 3.12’de de GTAW ve PAW yöntemlerinin bir karşılaştırması görülmektedir.

PAW’da metallerin birbirine birleştirilmesi, tungsten elektrotla iş parçası arasında (transfer edilmiş ark) ya da tungsten elektrotla şalumonun iç nozulu arasında (transfer edilmemiş ark) oluşturulan bir ark ile birleştirilecek parçaların

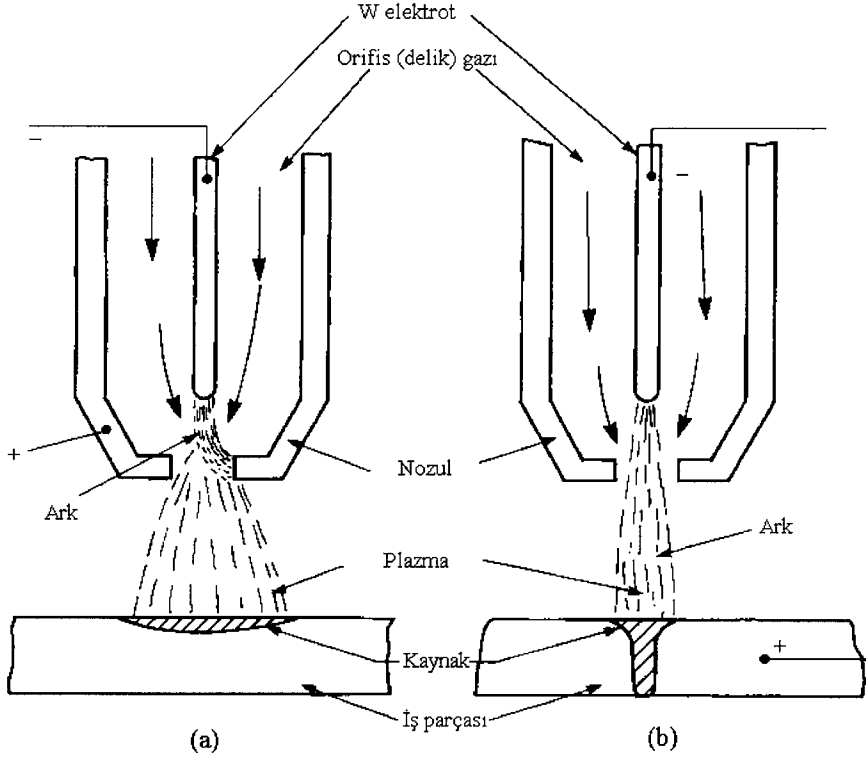
ısıtılmasıyla gerçekleşir. PAW'ı GTAW'den ayıran özelliği, ark gazının şalumo nozulundaki bir delik tarafından kısılarak yüksek yoğunluklu dar bir gaz kolonu oluşturmaktır. Bu gaz kolonu tüm kaynak akımını taşıdığından son derece sıcaktır ve gaz bir plazma oluşturacak derecede iyonlaşmıştır.



Şekil 3.12. GTAW (a) ve PAW (b) yöntemlerinin karşılaştırması [3]

İş parçası elektriki olarak (sabit elektrotla zıt kutba) şalumoya bağlandığında plazma elektriki olarak iş parçasına çekilir ve plazma oluşumu transfer edilmiş ark modunda çalışmayla gerçekleşmiş olur (şekil 3.13.b). İş parçası elektriki olarak şalumoya bağlanmadığında ve plazma iş parçasına soy gaz kuvvet ile yönlendirildiğinde plazma oluşumu transfer edilmemiş ark modunda çalışmayla gerçekleşmiş olur (şekil 3.13.a). Transfer edilmiş ark modu genelde kaynak için kullanılırken, transfer edilmemiş ark modu termal spreyl işleminde kullanılır.

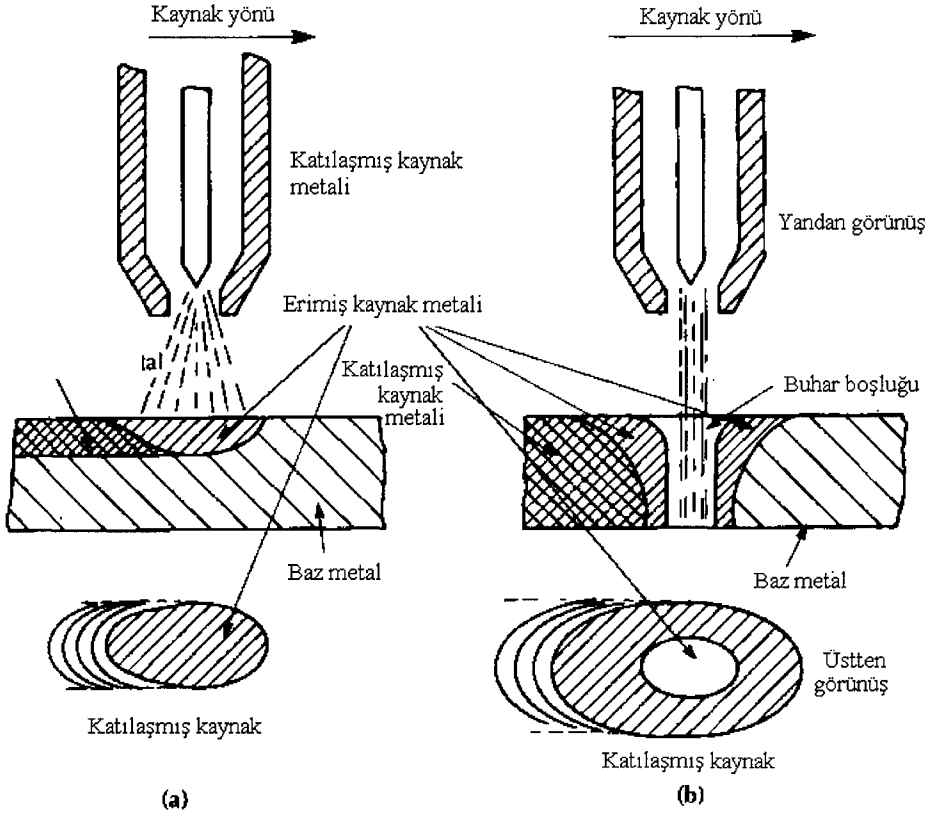
Ergimiş metalin korunması bir derece şalumodan çıkan sıcak iyonlaşmış gaz tarafından sağlanmakla beraber, bir dış gaz nozulundan gelen eşmerkezli bir soy gaz akımı ile ilave koruma sağlanır. Koruyucu gaz argon, helyum ya da helyum veya hidrojenle karıştırılmış argon olabilir. Birleştirilen alaşımın tipine göre doğru akım negatif elektrot (DCEN) ve değişken kutuplu sadmeli ark (VPPA) kaynak teknikleri kullanılabilir.



**Şekil 3.13. a) Plazma oluşumunda transfer edilmemiş ark modu [3]
b) Plazma oluşumunda transfer edilmiş ark modu [3]**

Plazma ark kaynağında birbirinden tamamen farklı iki kaynak modu vardır: “Melt-in” modu ve “keyhole” modu. Melt-in modunda iş parçasının ısıtılması, plazmanın iş parçasının yüzeyinin içi ile teması sonucu oluşan ısı iletimi ile sağlanır. Bu mod ince bölgelerin (0.025-1.5 mm) birleştirilmesi için, düşük akımlarda iyi kaynak yapmak için ve yüksek akımlarda 3 mm’ye kadar olan kalın kesitlerin birleştirilmesi için uygundur. Keyhole modunda çok yüksek akımlı plazmanın yüksek enerji yoğunluğu iş parçası içinde buharlaştırarak bir oyuk açar ve tıpkı bal mumu içindeki sıcak tel gibi oyuğu ilerleterek kaynak oluşturur. Buharlaşmış oyuğu çevreleyen erimiş metal, yüzey gerilmesi ya da kılcal kuvvetler tarafından çekilerek kaynağın firar kenarındaki oyuk doldurulur. Bu mod yaklaşık 20 mm’ye kadar olan derin bir penetrasyon gereken uygulamalar için mükemmeldir. Şekil 3.14’de bu iki mod görülmektedir [3].

Plazma ark kaynağının en büyük dezavantajı gerekli ekipmandır. Güç kaynakları, gaz kontrolörleri ve şalumolar çok karmaşıktır ve şalumolar el ile çalışma esnasında tutulması zor olacak kadar büyüktür. Bu yüzden plazma ark kaynağı genelde otomatik makinelerle gerçekleştirilir.



Şekil 3.14. a) Plazma ark kaynağındaki melt-in modu [3]

b) Plazma ark kaynağındaki keyhole modu [3]

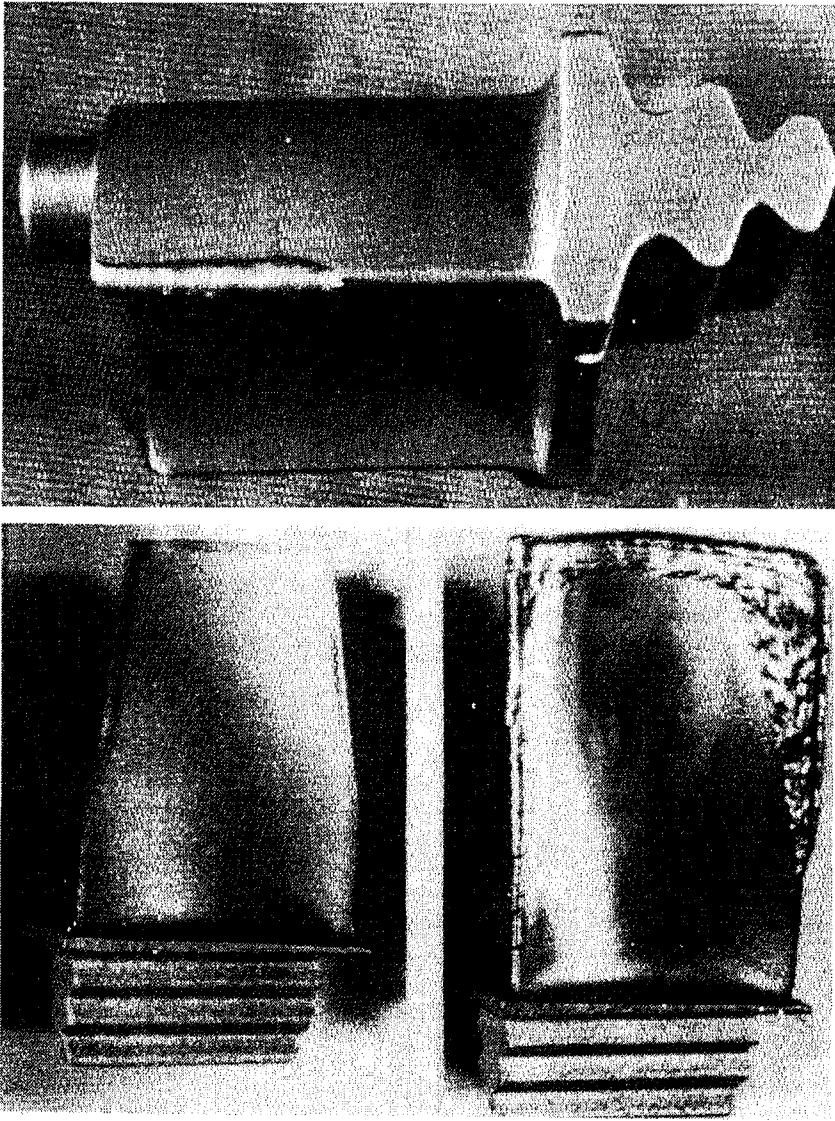
Plazma ark kaynağı gaz türbinli motorlarda genelde, iki parçanın birbirine birleştirilmesinden çok ana malzemenin üzerine dolgu malzemesinin doldurulmasıyla bir kaplama oluşturulmasında kullanılır ve bu işleme “plazma arkı ile dolgu kaynağı” adı verilir [8]. Bu yöntem, kullanım ortamlarına (şartlarına) karşı yetersiz bir dirence sahip zeminler üzerine korozyona, oksitlenmeye, aşınmaya ve ısıya karşı dayanıklı kaplamalar uygulamak için ve boyutları kullanım limitlerinin altına düşen parçaların boyutlarının restorasyonu için kullanılır.

Dolgu malzemesi olarak tel yerine toz dolgu kullanıldığında plazma arkı ile dolgu kaynağı yöntemi “plazma ile transfer edilmiş ark” (PTA) ismini alır. Tipik PTA uygulamalarında istenen kaplama kalınlığına ulaşmak için saatte 0.5-7 kg birikim hızıyla 0.6-3 mm kalınlığında dolgu malzemesi katmanları oluşturulabilir. Genelde 50-200 amperlik kaynak akımı kullanılır [8]. Zeminin kaynak penetrasyonu düşük olmakla beraber tipik PTA uygulamaları geniş bir HAZ üretir. Bu yüzden bu yöntem, aşırı burulma ve ergimeyi önlemek için yeterli kütleye sahip zeminler için uygundur. En küçük geleneksel plazma şalvolarıyla

bile üretilen ısı dar kenarların ve ince zeminlerin ergimesine ve burulmasına neden olduğundan 2.5 mm'den daha dar zeminlere uygulanamaz. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için Metbond® olarak bilinen patentli bir mikro plazma toz kaynağı (MPPW) yöntemi geliştirilmiştir [8].

MPPW düşük ısılı bir DCEN dolgu kaynağı yöntemidir. Toz şeklindeki dolgu malzemelerini kullanır ve 50 amperin altındaki kaynak akımları kullanılır. Hem sabit akım hem de sadmeli akım modlarında çalışabilir. İş parçasına olan ısı girişi düşük olduğundan HAZ küçüktür ve zemindeki burulma düşüktür. Zemine olan kaynak penetrasyonu düşüktür ve malzeme seçimi daha geniştir. Bu avantajları MPPW'in gaz türbinli motorlardaki kullanımını arttırmaktadır [8].

GTAW, GMAW, tel dolgulu PAW ve PTA gibi geleneksel yöntemler, paslanmaz çelik veya katı solüsyonla serleştirilmiş nikel ve kobalt alaşımlarından imal edilmiş sabit gaz türbini komponentlerinde kullanılırlar [8]. Çünkü bu alaşımlar oldukça iyi bir kaynak yapılabilme özelliğine sahiptirler. Hareketli türbin komponentlerinde kullanılan daha yüksek mukavemete sahip, çökeltiyle sertleştirilmiş nikel ve demir-nikel bazlı süper alaşımların kaynak yapılabilme özellikleri çok daha düşüktür ve bu tür malzemelerin kaynağı ancak MPPW gibi gelişmiş yöntemlerle mümkündür [8]. Tamamen otomatik plazma ark kaynak sistemleri yüksek basınç türbini palelerinin uçlarının restore edilmesinde ve yeni ya da aşınmış palelerin temas yüzeylerinin satıhça sertleştirilmesinde kullanılmaktadır. Kompresör paleleri ve kanatçıkları bu ileri teknoloji kullanılarak rutin olarak restore edilmekte ve manuel kaynak teknikleriyle ulaşılamayacak yüksek verime ve kaliteye ulaşılmaktadır. İleri teknoloji mikro plazma üniteleri tarafından üretilen daha yumuşak çan şekilli ark; bir çok pale ve kanatçık kaynağı uygulamaları için en maliyet etkin çözümü sağlamak amacıyla minimum ısı girişi için 0.1 ampere kadar hassas bir şekilde kontrol edilebilir [9]. Şekil 3.15'de plazma ark kaynağı işlemi görmüş jet motoru parçaları görülmektedir.



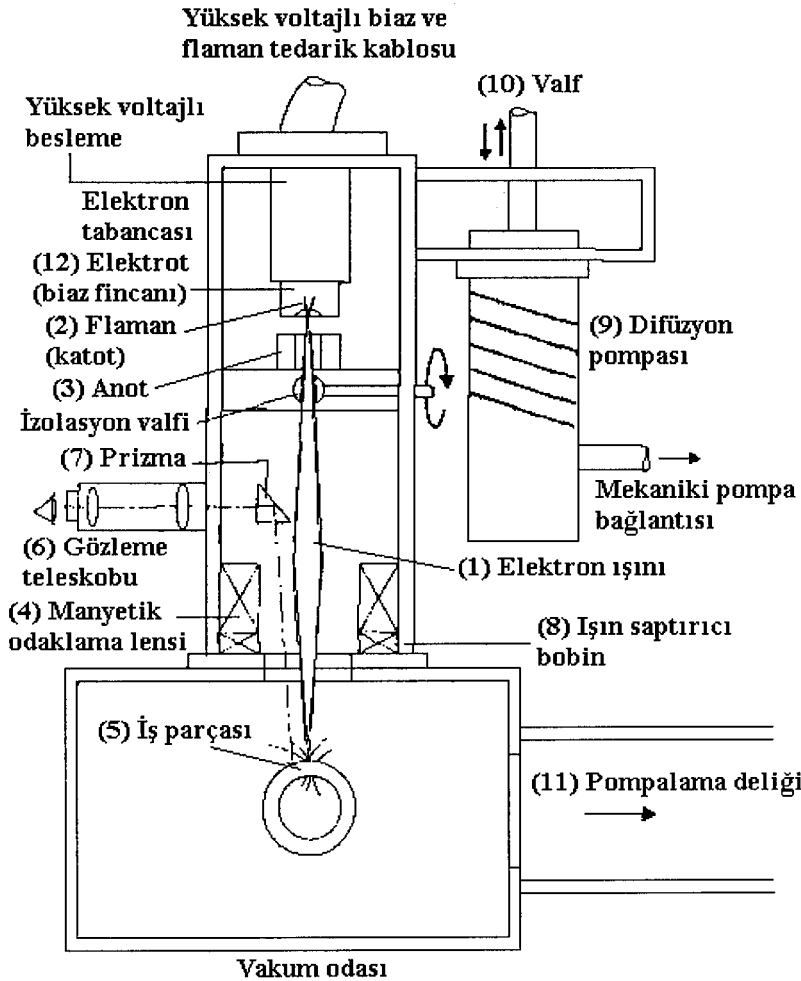
Şekil 3.15. Plazma ark kaynağı uygulanmış HPT paleleri [8,9]

3.1.2.6. Elektron ışın kaynağı

Elektron ışın kaynağı (EBW), yüksek hızlı (ses hızının yaklaşık %60'ı) elektronlardan oluşan bir ışının birleştirilecek yüzeyler üzerine yoğunlaştırılmasıyla gerçekleştirilen yüksek enerji yoğunluklu bir füzyon yöntemidir. Elektronlar bir flaman emitör (yayıcı), bir ön gerilim elektrodu ve bir pozitif yüklü anottan oluşan bir ışın tabancasında üretilir ve hızlandırılırlar. Bir flamandan termiyonik emisyon ile üretilen elektronlar anoda karşı olan çekme güçleri ile yönlendirilerek hızlandırılır. Emitörü çevreleyen bir ön gerilim elektrot fincanı elektronları elektrostatik bir şekilde ışına dönüştürür. Elektronlar anottan ayrıldıktan sonra saçılırlar ve bu etkiyi önlemek için bir elektromanyetik lens

sistemi ışını tekrar toplar ve yaklaşık 25 mm'nin üzerindeki bir mesafeden iş parçası üzerine odaklar [3,7,10,11].

Şekil 3.16'da görülen bir Wentgate elektron ışın makinesi şu komponentlerden oluşur: Bir elektron akımı (1) bir tungsten flamanın (2) ısıtılmasıyla oluşturulur ve flaman veya katot (2) ile anot (3) arasındaki yüksek voltaj ile hızlandırılır. Anot ve katodun dikkatli bir şekilde şekillendirilmesiyle elektronlar anot içindeki bir delikten geçerler ve saçılmaya başlarlar. Doğru akımla çalışan bir manyetik odaklama lensi (4) elektronları kaynak yapılacak parçanın (5) yüzeyindeki bir noktaya odaklar. Kaynak noktası ile ışının hassas bir şekilde hizalanması, bir prizmadaki (7) büyütücü camlar (6) vasıtasıyla ışının gözlenmesiyle sağlanır. İki çift saptırıcı bobin (8) üzerinden akan akımın ayarlanmasıyla ışın x ve y eksenlerinde doğru bir şekilde hareket ettirilebilir [7].



Şekil 3.16. Wentgate elektron ışın kaynağı makinesinin diyagramı

Kaynak tabancası ve kaynak asamblesinin tamamı vakum altında tutulur, yani kaynak olayı vakum altında gerçekleşir. Bunun nedeni;

- a) ışının hava molekülleri ile çarpışarak saçılmasını önlemek,
- b) anot ile katot arasında yüksek voltajlı boşalmaları (deşarj) önlemek,
- c) kaynak bölgesi ve iş parçasının yüzeyinde oksit kirliliğini önlemektir.

Bunların arasında en kritik olanı ciddi kaynak kusurlarına neden olabilen (b) tabancıdeşarjlarıdır. Bu sorunu çözmek için elektron tabancası bir difüzyon pompası (9) ve bir valf (10) ile sürekli olarak odadaki vakumdan daha yüksek bir vakuma pompalanır. Oda ise pompalama deliğinden (11) pompalanır [7].

Işın erimiş bir bölgeden oluşan ve içi boş bir merkeze sahip “keyhole” kaynağı oluşturur. Eğer ışın aniden kesilirse metal hızla katılaşıp ve delik mevcut durumda katılaşıp kusurlu bir kaynağa neden olur. Bu yüzden kusursuz bir kaynak oluşturmak için ışın gücünü kademeli bir şekilde azaltmak gerekir. Normalde dairesel kaynaklarda komple 360 derecelik ergime sağlamak için küçük bir bindirme gerekir. Işın gücünü kontrol etmek için katot ile triyot termiyonik valf içindeki bir ızgara ile aynı işleve sahip bir ön gerilim elektrot fincanı (12) arasındaki gerilim değiştirilerek akım düzenlenir. Böylece istenen kaynak penetrasyonuna ulaşmak için güç seviyesini ayarlamak için ışın gücünü birkaç watt’dan yüzlerce watt’a kadar hassas bir şekilde kontrol etmek mümkün olur [7].

Kaynak noktasındaki enerji yoğunluğu 10^8 W/cm^2 ’ye kadar çıkabilir ve bu enerji yoğunluğu yaklaşık 14000°C ’lik bir sıcaklık doğurur. Enerji yoğunluğu iş parçasına saniyede çarpan elektron sayısına, elektronlardaki kinetik enerjiyi temin eden hızlandırıcı voltaja (tipik olarak 25-200 kV) iş parçası üzerindeki spota ve kaynak hızına bağlıdır [7,11].

Üç farklı elektron ışın kaynağı yöntemi vardır:

1. Yüksek vakum: İş parçası 0.13-0.30 mPa basınçtadır.
2. Orta vakum: İş parçası 0.13-3300 Pa basınçtadır.
3. Vakumsuz: İş parçası hava ya da koruyucu bir gaz içinde atmosfer basıncındadır.

Her durumda verimli bir çalışma için elektron ışın tabancası 13 mPa ya da daha az bir basınçta olmalıdır [7,11].

Vakuma maruz kalan herhangi bir malzeme ya yüzeyinden, ya içinden ya da hem yüzeyinden hem de içinden gaz çıkarır. Yaklaşık 133 Pa'lık bir basınca ulaşıldıktan sonra sistemin çeperlerinden, su buharından, organik yağlardan ve metal contalardan gaz çıkar. Her ne kadar teorik olarak 15 saniye içinde basıncın 133 Pa'nın altına düşmesi gerekse de, gaz çıkmasından ve odanın boyutları ile pompanın kapasitesine olan bağımlılıktan dolayı bu olay 3-4 dakika sürebilir. Su molekülleri bir yüzeyde tutulduğunda ya da asıldığında buna soğurma adı verilir ve yüksek bir vakumun mümkün olabilmesi için nem temizlenmelidir [7].

Gaz çıkarma hızı sıcaklıkla artacağından, vakum odaları çoğunlukla gazların hemen temizlenebileceği bir sıcaklığa ısıtılır. Malzeme içinde sonsuz miktarda gaz bulunduğundan, ısıtmadan kaynaklanan gaz çıkış hızındaki artış belirli bir vakuma ısıtma olmayan durumdan çok daha kısa bir sürede ulaşılmasını sağlar. Vakum odalarının yapısında kullanılan malzemeler temizlenebilmeli, korozyona neden olmamalı ve gazlara karşı geçirgen olmamalıdır. Bir vakum sisteminin farklı bölgeleri farklı basınçlarda olabilir. Düşük vakumlu bölgelerde çoğunlukla pirinç ya da bakır kullanılırken, yüzeyleri kolayca parlatılıp temizlenebildiğinden paslanmaz çelik ve cam yüksek vakumlu bölgelerde kullanılır. Özel yağlar ve gresler yüksek vakum uygulamaları için geliştirilmiştir ve olağan sıcaklıklarda çok düşük buhar basınçlarına sahiptirler [7].

Herhangi bir vakum sistemi kaçaklardan, sistemin çeperlerindeki gaz difüzyonu ya da vakum odasındaki malzemelerin çıkardığı gazlardan dolayı bir en düşük basınç değerine ulaşır ve bu değerin ötesine pompalanamaz. Gerekli basınç ne kadar düşük olursa temizlemesi gereken gaz hacmi o kadar büyük olur ve bu da vakum pompasının tasarım ve kapasitesini belirler. Yüksek vakumlu uygulamalar için genelde 13 mPa ya da daha düşük bir basınç üretebilen mekanik bir pompa (pistonlu ya da rotari kanatçık tipi) ve bir difüzyon pompası kullanılır. Orta vakumlu uygulamalarda ise difüzyon pompasına gerek duyulmaz [7,11].

EBW diğer kaynak yöntemlere göre bir takım avantajlara sahiptir. En önemli avantajlarından birisi ark kaynaklarından daha derin ve daha dar kaynakları, ark kaynağı için gerekenden çok daha düşük bir ısı girişi ile üretebilmesidir. Daha düşük ısı girişi sayesinde iş parçasında dar bir HAZ oluşturur ve iş parçasında çok daha az termal etki yaratır. EBW'de kullanılan çok

temiz vakum ortamı oksit ve nitrat kirliliğini önler. Yüksek kaynak hızlarına ulaşılabildiğinden kaynağın tamamlanma süresi kısalmış ve yöntemin üretkenliği ve enerji verimi artar. EBW'nin toplam enerji dönüşüm verimi yaklaşık %65'dir ve bu konvansiyonel kaynak yöntemlerinden çok daha yüksektir. EBW bu özellikleri sayesinde;

1. kaynak esnasında burulma ve büzülmeyi en aza indirir,
2. bir çok sertleştirilmiş metalin mekanik özellikleri bozulmadan kaynatılmasını mümkün kılar,
3. ısıya hassas komponentlerin kaynağını mümkün kılar,
4. ark kaynağı yöntemleriyle birleştirilemeyen ısıya dayanıklı metallerin, reaktif metallerin ve bir çok farklı metal kombinasyonlarının kaynağını mümkün kılar.

Bu avantajlarının yanında EBW'i sınırlayan bir takım etkenler vardır. EBW' de kullanılan ekipmanların maliyeti genelde konvansiyonel kaynak yöntemlerinde kullanılan ekipmanların maliyetinden daha yüksektir. Mevcut vakum odası kapasitesi ve buna bağlı olarak iş parçası boyutları ve kaynak hızı sınırlıdır. Bu sayılan avantaj ve dezavantajların çoğu genelde tüm EBW'in tüm yöntemleri için geçerli olmakla birlikte bazıları vakumsuz EBW için geçerli değildir. Vakumsuz EBW çok temiz ortam avantajına sahip değildir. Bunun için helyum ya da argon gibi bir soy gaz korumasına ihtiyaç duyulur. Ulaşılabilecek maksimum kaynak penetrasyonu sınırlıdır. Bununla birlikte yüksek kaynak hızlarına sahiptir ve vakumdan kaynaklanan dezavantajlar bertaraf edilmiştir [11].

Elektron ışınlarının üretilmesinde kullanılan yüksek voltaj, ışının kendisi ve ışının iş parçasına ya da diğer maddelere çarpmasıyla oluşan x ışınları operatörler için potansiyel bir tehlikedir. Ergimiş kaynak metalinin yaydığı yoğun radyasyonun çıplak gözle izlenmesi zararlı olduğundan elektron ışın kaynağı işlemi bir filtreli lens ile gözlenmelidir. 20 kV'un altındaki hızlandırıcı voltaj yumuşak x ışınları üretirken 20 kV'un üzerindeki voltajlar sert x ışınları üretmektedir. Bu nedenle tabancada kullanılan hızlandırıcı voltaj yükseldikçe radyasyona karşı korunma önlemleri daha bir gereklilik kazanır. Sistemdeki güvenlik önlemleri ekipmanın kapılar açıkken ya da operatör muhafazanın içindeyken kullanılmasını önlemedir. Tüm pencereler x ışınlarını emmeleri için

kurşun camlı olmalıdır. Kaynak esnasında ortaya çıkan zararlı ozon ve nitrojen oksitleri muhafazanın dışına atılmalıdır [7,11].

Aşınmış ya da hasar görmüş komponentlerin yenilenmesi kaynak teknolojisi için önemli bir uygulamadır. Dolgu kaynağı yöntemi ile boyutların ve yapısal bütünlüğün yenilenmesi en uygun ve maliyet etkin yöntemdir. Manuel ya da otomatik GTAW ve GMAW gibi kaynak yöntemleri bu tür onarım işlemleri için geleneksel bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde dolgu kaynağı için uygun bir tel dolgu malzemesi kullanılmaktadır. Bu yöntemler verimli ve hızlı bir şekilde dolgu malzemesinin ergitilmesini sağlamakla beraber iş parçasına oldukça yüksek ısı girişine neden olduklarından ince kesitlerde burulmaya sebep olmaktadır. Geleneksel kaynak yöntemlerine nazaran bir çok avantaja sahip EBW yönteminin yenileme işlemlerinde kullanımı geçmişte sınırlı tutulmuştur. Fakat otomatik tel besleme sistemlerine sahip EBW ekipmanlarının üretilmesi EBW'nin bir onarım yöntemi olarak kullanımını yaygınlaştırmıştır. Dolgu kaynağında kullanılan elektron ışın kaynağı üniteleri yüksek voltajlı, yüksek vakumlu (150 kV, 13 mPa) makinelerdir [12]. Kontrol edilmiş kaynak atmosferinin mevcudiyeti özellikle titanyum gibi reaktif malzemelerin kaynağında elektron ışın yöntemi için belirgin bir avantajdır.

Tel beslemeli elektron ışın kaynağı yöntemi özellikle hasar görmüş gaz türbinli uçak motoru komponentlerine uygulanmaktadır. Bu komponentler tipik olarak silindir şeklindedirler, çapları 100-1525 mm, uzunlukları 25-915 mm ve kesitleri 1.3-12.7 mm arasındadır [12]. Gaz türbinli motor komponentlerinin yenileştirme işlemleri hem ticari hem de askeri işletmeler için giderek daha cazip bir hale gelmiştir. Çünkü yenileştirme işlemleriyle hem maliyetler düşmekte hem de yedek parçaların edinimi için gereken süre ortadan kalkmaktadır. Yenileme işlemleri tipik olarak yeni bir komponent maliyetinin %50-70'i kadar bir maliyetle ve parça değişimi için gereken süreden 3-6 kat daha kısa bir süre içinde gerçekleşmektedir [12].

Tel beslemeli elektron ışın kaynağı yönteminin en çok uygulandığı gaz türbini komponent yenileme işlemi motorun basınç gradyanlarını yükseltmek için kullanılan dönen labirent contaların (labyrinth-type air seal) yenilenmesidir. Bu contalar aşındığında ya da hasarlandığında motor verimi düşer ve yakıt sarfıyatı

yükselir. Bu yüzden en düşük conta kleransının sağlanması çok önemlidir. Conta tasarımı genelde düz bıçak kenarı ya da konik bıçak kenarı şeklindedir. Kullanılan malzeme ise demir bazlı alaşımlar (AMS 6508 ve A-286), yüksek nikel alaşımları (Incoloy 901 ve Waspoloy) ve titanyum alaşımlarıdır (Ti-6Al-4V, Ti-8Al-1Mo-1V, ve Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo) [12].

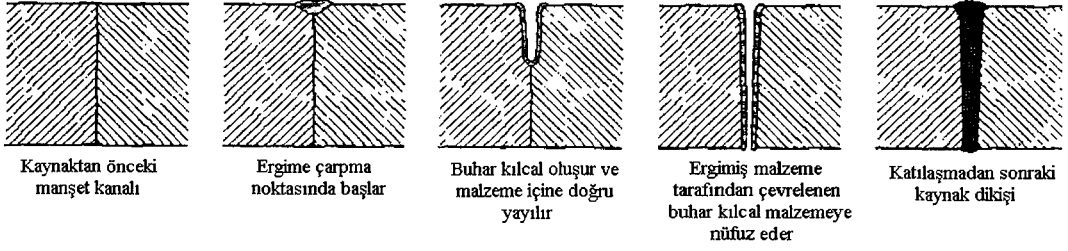
Hassas tel beslemeli elektron ışın kaynağı yönteminin gaz türbinlerindeki contaların yenileme işlemlerinde kullanılması, hem dolgu kaynağı sistemlerinin malzeme uygulama verimini ve maliyet avantajlarını hem de EBW yönteminin düşük ısı girişi ve kontrollü atmosfer avantajlarını sunmaktadır.

3.1.2.7. Lazer ışın kaynağı

Lazer ışın kaynağında (LBW) ısı kaynağı olarak yüksek yoğunluklu (10^5 - 10^7 W/cm²) eş evreli (koherent) optik enerji kaynakları kullanılır [13,14,15]. Lazer kelimesinin orijinali İngilizce’de “laser” şeklinde yazılır ve radyasyonun uyarılmış emisyonu ile ışık amplifikasyonu anlamına gelen “light amplification by stimulated emission of radiation” kelimelerinin baş harflerinden oluşur. Lazer ışınının eş evreli doğası ışının çok küçük bir noktaya odaklanarak yüksek enerji yoğunlukları üretmesini sağlar.

Lazerler, gaz lazerler (CO₂, CO-argon ve helyum-neon) ve katı hal lazerleri (yakut, cam ve YAG) olmak üzere iki grupta incelenebilir [14,15,16]. Lazer teknolojisi genelde delme ve kesme gibi malzeme işleme yöntemlerinde kullanılmaktadır. Bu yüzden lazerler hakkında ayrıntılı bilgi 4. bölümde verilmiştir. Bununla birlikte ileri teknoloji bir kaynak yöntemi olarak CO₂ ve YAG lazerleri gaz türbinli motorların parça yenileme işlemlerinde kullanılmaktadır.

Elektron ışın kaynağına benzer olarak çarpma noktasındaki yüksek güç yoğunluğu, enerjinin tüm kaynak derinliğince emildiği bir kılcal ya da “keyhole” oluşturur. Kılcal, birleştirmeyi oluşturmak için çarpma noktasının arkasında katılaştıran erimiş metal tarafından çevrelenir. Şekil 3.17’de lazer ışın kaynağı şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.17. Lazer ışın kaynağı [7]

Lazerin 10^6 W/cm²'den daha büyük bir enerji yoğunluğu üretebilme yeteneği kaynak işlemlerde kullanılmasındaki temel faktördür. Çizelge 3.1'de lazer ışın kaynağının bazı özellikleri diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Lazer ışın kaynağının temel avantajları şu şekilde sıralanabilir:

1. Odaklanmış lazer ışını yüksek bir enerji yoğunluğu sağlar.
2. Lazer kaynağı oda atmosferinde kullanılabilir.
3. Kaynatılması güç malzemelerin (titanyum ve kuvars gibi) kaynağı mümkündür.
4. Elektroda ve dolgu malzemesine ihtiyaç yoktur.
5. Dar kaynaklar yapılabilir.
6. Çok az birikimli ya da birikimsiz kaynaklar yapmak mümkündür.
7. Kaynaktan doğan HAZ çok dardır.
8. İş parçasına olan ısı girişi düşük olduğundan iş parçasında burulma en azdır.
9. Otomatik ışık saptırma teknikleri kullanılarak karmaşık şekillerin kaynağı yapılabilir.
10. Mükemmel mekanik özelliklere sahip iyi tanecikli bir yapı oluşturur.

Bu avantajlarının yanında lazer kaynağının bir takım dezavantajları da vardır. Birleştirilecek parçaların birbiriyle hassas bir şekilde hizalanmaları sıradan ark kaynağı yöntemlerine göre daha kritiktir. Bir lazer ışını için tipik odak noktası çapı 100-1000 μ m arasında değişmektedir. Buna ilaveten lazer kaynağı ekipmanlarının maliyeti karşılaştırılabilir ark kaynağı sistemlerinininkinden neredeyse 10 kat daha pahalıdır. Ayrıca lazer kaynağı ile ulaşılabilen kaynak penetrasyonu elektron ışın kaynağına nazaran daha azdır [7,13,14].

Çizelge 3.1. LBW'nin diğer kaynak yöntemlerine göre enerji sarfıyatı ve verimi [13]

Kaynak yöntemi	Enerji kaynağının yoğunluğu		Verim mm ² /kJ
	W/cm ²	W/inç ²	
Oksiasetilen kaynağı	10 ² -10 ³	6x10 ² -6x10 ³	0.2-0.5
Ark kaynağı	5x10 ² -10 ⁴	3x10 ³ -6x10 ⁴	0.8-2 (a) 2-3 (b)
Plazma ark kaynağı	10 ³ -10 ⁶	6x10 ³ -6x10 ⁶	5-10
Lazer ışın kaynağı	10 ⁵ -10 ⁷	6x10 ⁵ -6x10 ⁷	15-25
Elektron ışın kaynağı (a) GTAW, (b) GMAW	10 ⁵ -10 ⁸	6x10 ⁵ -6x10 ⁸	20-30

Lazer ile ancak elektron ışın kaynağı ile ulaşılabilecek kalite ve hassasiyette birleştirmeler yapılabilir. Elektron ışın kaynağı ve lazer ışın kaynağı yöntemleri iş parçasının ergitilmesi için gerekli ısıyı iş parçasına yüksek hızla çarpan elektron veya fotonlarla sağlarlar. Bununla birlikte her iki yöntemin de kendine has avantaj ve dezavantajları vardır. Çizelge 3.2'de elektron ışın kaynağı ve lazer ışın kaynağı yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.2. EBW ve LBW yöntemlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları [3]

EBW	LBW
* Tüm malzemelerde derin penetrasyon.	* Bir çok malzemede derin penetrasyon. Fakat lazer ışığını yansıtan metaller hariçtir.
* Çok dar kaynak.	* Çok dar kaynak.
* Düşük ısı girişi ve yüksek enerji yoğunluğu.	* Düşük ısı girişi ve yüksek enerji yoğunluğu.
* Elektronların engelsiz bir şekilde hareket etmesi için vakuma ihtiyaç duyar.	* Havada ya da vakumda çalışabilir.
* Genelde sıkı geçmeli bağlantılar gerektirir.	* Genelde sıkı geçmeli bağlantılar gerektirir.
* Dolgu eklemek zordur.	* Çok derin olmamak şartıyla dolgu eklenebilir.
* Pahalı ekipman.	* Pahalı ekipman.
* Elektriki olarak çok verimli (%99).	* Elektriki olarak çok verimsiz (%12).
* x ışınları üretir.	* x ışını yoktur.

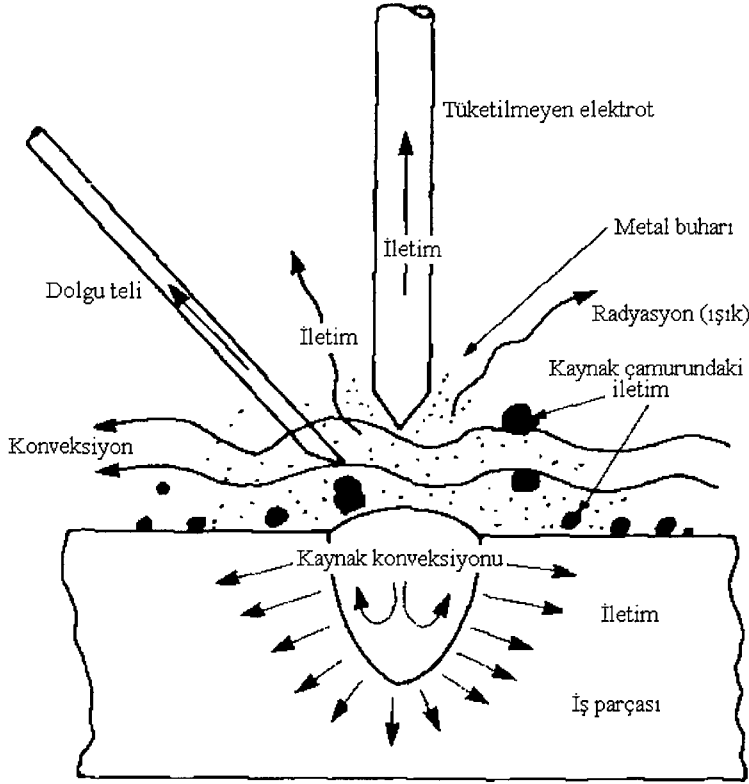
Bir YAG lazeri demir alaşımları, alüminyum, platin, bakır (eğer yeterince ince ise) ve benzeri malzemelerin ince kesitlerini iyi bir şekilde kaynak yapabilir. Hava geçirmez contalar sadmelerin üst üste bindirilmesiyle kolayca yapılabilir. Tipik kaynak parametreleri uzun sadme genişlikleri, yüksek güç ve dikiş kaynağı durumunda yüksek sadme oranlarıdır. 0.5-0.75 mm'lik spot boyutları lazer kaynağı için normaldir. Tipik penetrasyon birçok malzemedede optimum ayarlarda yaklaşık ışık genişliğine eşittir [15].

Normalde birleştirilecek malzemeler birbirine sıkıca oturmalıdır. Eğer bir bindirme kaynağı gerekiyorsa iyi bir yüzeyler arası temas gerekir. Alın kaynağı için parçalar arasındaki boşluk en az 0.125 mm olmalıdır. Oksitlenmenin azaltılması ve optiklerin temiz tutulması için kaynak işlemlerinde koruyucu gaz kullanışlıdır. Genelde helyum ya da argon gibi bir soy gaz kullanılır. Nitrojen ve CO₂ de kullanışlıdır ve çok pahalı değildir. Parçanın kullanılan gaz tarafından çevrelenmesine yetecek kadar düşük gaz akışları kullanılır [15].

Yüksek güçlü CO₂ lazerleri kaynatılan metal tipine bağlı olarak 20 mm kalınlığa kadar tam penetrasyonlu kaynaklar oluşturabilir. Çelikler, nikel bazları ve titanyum alaşımları kolayca kaynak yapılabilir. Fakat bakır-nikel alaşımları ve ısıya dayanıklı metaller için daha fazla güç gerekir. Metal yüzeyinin yüksek yansıtıcılığı ve ısı iletkenliğinden dolayı aşırı ısıtmadan ve aralıklı plazma oluşumundan doğan süreksizlikler olabileceğinden, alüminyum alaşımlarının gaz lazer ile kaynak yapılması daha zordur [7].

3.1.2.8. Füzyon kaynağında transfer verimi

Füzyon kaynağı yöntemlerinde enerji kaynağı ile iş parçası arasında enerji kaybına yol açacak birçok etken vardır. Tüm kayıpların toplamı yöntemin enerji transfer verimini tanımlar. Şekil 3.18'de bu kayıpların bir kısmı görülmektedir. Kaybı önleyen ya da azaltan herhangi bir şey enerji transfer verimini en çok 1.00 ya da %100'lük bir değere yükseltir [3].



Şekil 3.18. Füzyon kaynak yöntemlerindeki transfer verimini etkileyen enerji kayıpları [3]

Çizelge 3.3’de bu bölümde incelenen füzyon kaynak yöntemleri için tipik transfer verimleri görülmektedir. Transfer verimi önemlidir çünkü iş parçasına ısı girişini ve buna bağlı olarak iş parçası içindeki ısı dağılımını etkilemektedir.

Çizelge 3.3. Tipik enerji transfer verimleri [3]

Yöntem	Transfer Verimi (%)
Gaz kaynağı	25 - 80
Gaz tungsten ark kaynağı	
Düşük akımlı DCSP	40 - 60
Yüksek akımlı DCSP	60 - 80
DCRP	20 - 40
AC	20 - 60
Gaz metal ark kaynağı	
Katı damlacık ya da kısa devre	70 - 85
Sprey	65 - 75
Koruyuculu metal ark kaynağı	65 - 85
Elektron ışın kaynağı	
Melt-in	70 - 85
Keyhole	80 - 95

Çizelge 3.3. Tipik enerji transfer verimleri (devam)

Yöntem	Transfer Verimi (%)
Lazer ışın kaynağı	
Yansıtıcı	0.05 →
Keyhole	50 - 70

3.2. Sert Lehim

Sert lehim, malzemelerin uygun bir sıcaklığa ısıtılması ve 450°C'nin üzerinde ana malzemelerin katı hal sıcaklıklarının altındaki sıcaklıklarda sıvı halde olan bir dolgu malzemesinin kullanılmasıyla birleşme sağlayan bir tekniktir. Dolgu malzemesi ya da dolgunun ana malzemelerden farklı bir kompozisyona sahip olması gerekir ve bağlantının sıkı birleşme yüzeyleri arasından yüzeysel ısıtma, kimyasal reaksiyon ya da yayılma şeklinde dağıtılır. Dolgunun bağlantı arasından akmasında kılcal etki temel rolü oynar. Dolgu malzemesiyle ana malzeme arasında kimyasal bağlar oluşur ve dolgudaki elementlerin ana malzemenin içine difüzyonu gerçekleşir. Sert lehim dolguları; metallerin ya da seramiklerin kendi aralarında ya da birbirleriyle birleştirmelerinde metalik, seramiklerin birleştirilmesinde de seramik olabilir. Bağlanma genelde primerdir. Dolgunun ve ana malzemenin ya da malzemelerin özelliklerine bağlı olarak iyonik, kovalent ya da iyonik-kovalent olabilir [3,17].

Pirinç kaynağı olarak adlandırılan bir diğer yöntem ana malzemenin ergitilmemesine rağmen aslında bir sert lehim yöntemi değildir. Pirinç kaynağında bir dolgu metali kesinlikle kullanılacağı yerdeki bir kanala ya da şerit içine koyulur ve yüzey gerilmesi veya kılcal etki ile yayılma bir etken değildir. Ayrıca ana malzemede sınırlı ergime görülebilir.

Gerçek bir sert lehim yöntemi olabilmesi için aşağıdaki kriterlerin sağlanması gerekir:

- Parçalar ana malzeme ergitilmeksizin dolgu kullanılarak birleştirilmelidir.
- Dolgu malzemesi 450°C veya 840°F'nin üzerinde sıvı fazda olmalıdır.

- Dolgu malzemesi ana malzemenin yüzeylerini ıslatmalı ve dolgunun sert lehim işlemi esnasında eklenmesine veya önceden yerleştirilmesine göre bağlantı içine akmalı ya da bağlantı üzerinde tutulmalıdır.

Sert lehim (brazing) yumuşak lehimden (soldering) dolgu malzemesinin ergime sıcaklığına göre ayrılır. Yumuşak lehimde dolgu malzemeleri 450°C'nin altında ergirler [3].

Sert lehim yöntemlerinden herhangi birini kullanarak iyi bir birleştirme elde edebilmek için dört temel eleman gözönünde bulundurulmalıdır:

1. Bağlantı tasarımı ve kleransı.
2. Dolgu malzemesi.
3. Bağlantının ısıtılması.
4. Koruyucu ya da reaktif lehim pastası.

Dolgu malzemesi doğru bir şekilde yerleştirildiğinde, bağlantı tasarımı ve birleştirilecek parçalar arasındaki boşluk, dolgu için uygun bir kılcal etki sağlamalıdır. Dolgunun yayılmasına imkan tanımak ve bağlantının etrafını kaplamasını sağlamak gerekir. Dolgu malzemesi ana malzeme veya malzemelerden daha düşük sıcaklıklarda (fakat 450°C'nin üzerinde) ergimelidir ve ıslanma ve interdifüzyon için ana malzeme ile uyumlu olmalıdır. Bu, dolgunun en azından bazı bileşenlerinin zemin malzemesinin solventi içinde çözünebilmesi gerektiği ya da tam tersi anlamındadır. Sert lehim için ısı bağlantıya lokal olarak uygulanabilir ya da sert lehim yapılacak asamblenin tamamı ısıtılabilir. Her iki durumda da bağlantıda dolgunun eriyebileceği, ıslanacağı ve yayılacağı bir sıcaklığa ulaşmalıdır ve bu sıcaklık düzgün (üniform) olmalıdır. Temizlenmiş temas yüzeylerinin ısıtma esnasında ve lehim akışı boyunca oksitlenmesini önlemek için sert lehim esnasında koruyucu maske gerekir. Bu, kimyasal bir lehim pastası ya da soy gazların oluşturduğu bir atmosferle sağlanabilir. Bazen lehimlenecek yüzeylerin gerçekten temizlenmesi ve aktifleştirilmesi için reaktif bir lehim pastası ya da atmosfer gerekir [3,17].

3.2.1. Sert lehimin avantaj ve dezavantajları

Sert lehim yöntemi bir takım avantajlara ve bunun yanında bazı sınırlama ve kusurlara sahiptir. Avantajlarının içinde belki de en önemlisi sert lehimin malzemelerin özel metalürjik karakteristiklerini korumak suretiyle ana malzeme üzerinde çok az ya da hiç etkisinin olmamasıdır. Sert lehimde zemin malzemesi ergimez ve böylece büyük yapısal değişiklikler oluşmaz. Bununla birlikte genelde bir miktar interdifüzyon görülebilir, fakat genelde bu kompozisyonda büyük değişikliklere yol açmaz. Bazı sert lehim yöntemleri ve ana malzemeler için zemin üzerinde bir miktar ısı etkisi vardır. Bunun nedeni ısıнын, zeminin ergime sıcaklığıyla karşılaştırıldığında oldukça düşük olması ve/veya ısıtmanın yüksek ölçüde bölgesel olmasıdır. Lehimleme sıcaklıkları oldukça düşük tutulabildiğinden (zeminlerin ergime sıcaklıklarıyla karşılaştırıldığında) ana malzemenin ergimesinin istenmediği ya da ergiyemeyeceği durumlar için bu yöntem ideal bir seçenektir. Diğer sert lehim yöntemleri için tüm yapı, lehimleme sıcaklığına yükseltilir. Bu yüzden, zeminlerin ergime sıcaklığıyla karşılaştırıldığında lehimleme sıcaklığı yüksekse ısı etkileri büyük olabilir. Her durumda ısı etkisi üniformdur [3,17].

Bu özelliklerinden dolayı sert lehim, farklı malzeme tipleri ve kompozisyonlarının birleştirilmesi için ideal bir seçenektir. Dolgu, bağlantı içindeki tüm zemin malzemelerini ıslatır ve böylece genelde sağlam birleştirmeler elde edilir. Sınırlı birbirine karışma (intermix) bu önemli avantaja katkıda bulunur.

Sert lehim yöntemi döküm, dövme ya da toz metalürjisi ile işlenmiş (gözenekli malzemeler dahil) metalleri, farklı (dissimilar) metalleri, oksitli ve oksitsiz seramikleri birleştirme, metalleri seramiklere birleştirme ve fiber ya da dağılmaya karşı güçlendirilmiş kompozitler ile metalik ya da seramik matrisleri birleştirme yeteneğine sahiptir. Büyük bağlantı alanları ya da uzun bağlantılar için basit bir yöntem sağlar. Bindirme bağlantılardaki ince lehim tabakasının yüzey bağlama etkisi, tıpkı yapıştırıcıyla birleştirmede olduğu gibi mükemmel gerilme dağılımı sağlar. Bu konudaki tek dezavantaj yüklemenin gerilme şeklinde olduğu durumlarda bağlantının inceliğinden kaynaklanan etkili bir çentik etkisinin (notch effect) oluşabilmesidir. Bu yöntem ayrıca birden fazla bileşenden oluşan karmaşık

asamblelerin ucuz bir şekilde fabrikasyonuna imkan tanır. Son olarak sert lehim oldukça gerilmesiz şartlarda büyük yapıların birleştirilme imkanını sağlar ve üretim esnasında hassas toleranslar sağlar [3].

Servis açısından bakıldığında lehimli bağlantılar yüksek sıcaklıklarda sınırlı bir kullanıma ve sağlamlığa sahiptir. Bunun nedeni dolgunun düşük ergime noktası ile dayanımı ve bazı dolgu bileşenlerinin yüksek difüzyon oranıdır. Doğru dolgu ve yöntem seçimiyle bağlantının sıcaklık yeteneği ana malzemeninkine yaklaşabilir. Çizelge 3.4’de sert lehimin avantaj ve dezavantajları özetlenmiştir [3].

Çizelge 3.4. Sert lehimin avantaj ve dezavantajları [3]

Avantajlar	Dezavantajlar
1. Ana malzemenin kompozisyonu üzerinde çok az ya da hiç etkisi yoktur. 2. Mikro yapı üzerinde genelde çok az ısı etkisi vardır ya da birçok özel yöntem için düzgün bir etkiye sahiptir. 3. Ana malzeme ergimez. 4. Farklı malzeme tipleri ve kompozisyonlarının birleştirilmesi için mükemmeldir. 5. Geniş alanların birleştirilmesine imkan tanır, gerilmeleri düzgün bir şekilde tüm alana dağıtır. 6. Çok farklı kalınlıkların birleştirilmesine, özellikle ince-ince ya da kalın-kalın bağlantılara imkan tanır. 7. Gözenekli malzemelerin birleştirilmesine imkan tanır. 8. Karmaşık çok bileşenli asamblelerin ucuz bir şekilde fabrikasyonu. 9. Çok düşük burulma ya da birikmiş gerilme. 10. Otomasyonu kolay.	1. Yüksek sıcaklıklarda sınırlı kullanım ve sınırlı sağlamlık. 2. Lehim katmanının inceliğinden dolayı etkili bir çentik etkisi olabilir. 3. Lehim pastası ya da atmosfer kontrolünü ve pasta artıklarının giderilmesini gerektirir. 4. Kontrol edilen boşluğa ya da kleransa sahip bağlantılar gerektirir.

3.2.2. Sert lehim prensipleri

Genelde sert lehimli bağlantılar oldukça geniş alana ve çok küçük bir kalınlığa sahiptir ve sert lehim işlemi baskın bir şekilde yüzey şartları tarafından kontrol edilir. En basit sert lehim uygulamasında dört kritik basamak vardır. İlk önce birleştirilecek yüzeyler metal zeminler üzerindeki kirlerin ve oksitlerin kaldırılması için temizlenir. Sonra, metallerin ve alaşımların lehimlenmesinde, yüzeyler lehim pastası adı verilen ve mevcut katı metal oksitleri eritme ve yeni oksitlenmeyi önleme yeteneğine sahip bir madde ile kaplanır. Sonra bağlantı

bölgesi, lehim pastası eriyerek kimyasal etkinliği ile ana malzemeleri temizleyene kadar ısıtılır ve daha sonra bağlantı bölgesi sıvı lehim pastası tabakası tarafından tekrar oksitlenmeye karşı korunur. Son olarak sert lehim dolgusu bağlantı bölgesinin üzerindeki bir noktada eritilir ve ıslanmadan kaynaklanan daha düşük yüzey enerjisi ile dolgunun daha yüksek yoğunluğunun bir kombinasyonu sayesinde lehim pastası ile dolgu yer değiştirir.

Sert lehimleme işlemi, lehim pastaları yerine bazen aktif gaz atmosferi içinde gerçekleştirilir. Bu atmosfer, temizlenmesi gereken parçalar için hidrojen olabilir ya da temiz parçalar için soy gaz atmosferi ya da vakum olabilir. Atmosfer kullanıldığında temizleme gereksinimi sayesinde potansiyel korozif pasta atıkları önlenmiş olur.

Sert lehim yapılacak bağlantılar genelde oldukça küçük kleranslarla (boşluklarla) yapılırlar. Tipik olarak 0.025-0.25 mm [3]. Eritilmiş dolgunun yüksek akışkanlığı da önemli bir özelliktir. Bağlantı asamblesinin doğru şekilde konumlanması, hizalanması ve boşluğun ayarlanması genelde özel alet ve ekipman gerektirir. Dolgunun katılaşmasından sonraki hacim değişiminden ve ısıl büzülmeden kaynaklanan büzülme gerilmesi (kaynak gerilmesi) kaynakla karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Bu yüzden sert lehimli bağlantılar oldukça gerilmesiz bir şartta yapılırlar.

3.2.3. Sert lehim yöntemleri

Sert lehim yöntemleri, kaynak yöntemlerinde olduğu gibi ısı kaynağı ya da ısıtma metoduna göre belirlenir. Manuel yöntemler mümkündür, fakat otomatik yöntemler daha yaygındır. Bazı yöntemler bağlantının ısıtılmasını sınırlarken, diğerleri tüm lehim asamblesini ısıtırlar. Bu bölümde endüstriyel öneme sahip ve güncel yöntemler incelenmiştir. Bunlar; şalumo lehim, fırın lehim, indüksiyon lehim, direnç (rezistans) lehim, daldırma lehim, kızılötesi lehim ve difüzyon lehimidir. Ayrıca lazer lehim, elektron ışın lehim, ultrasonik lehim, mikro dalga lehim, buhar fazı lehim ve basamaklı lehim gibi bazı özel sert lehim yöntemleri mevcuttur. Sık sık bir sert lehim yöntemi olarak kabul edilen piring kaynağı aslında kaynakla ilgili bir hibrit işlemdir. Fırın, daldırma ve

buhar fazı lehimleri haricindeki tüm yöntemler lokal ısıtma ile uygulanabilir [3,17].

3.2.3.1. Şalumo lehim

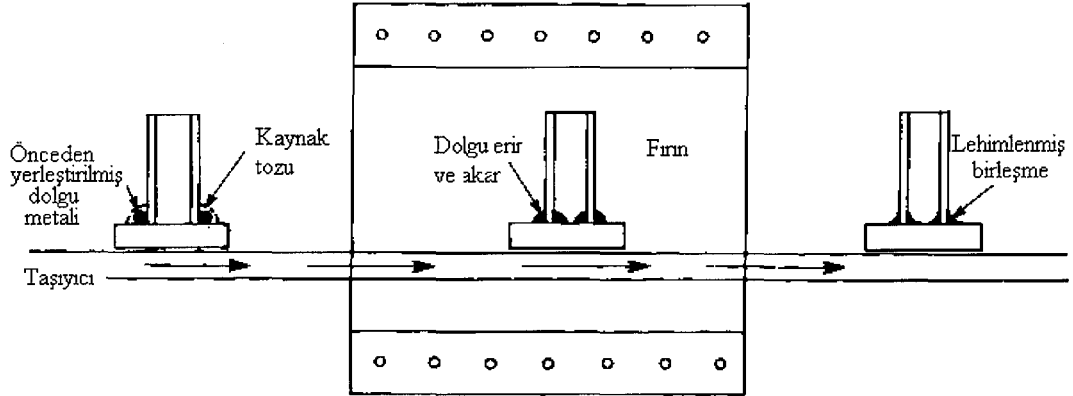
Şalumo lehim birleşme bölgesinin bir ya da daha fazla şalumo ile ısıtılmasıyla gerçekleştirilir. Sıcaklığa ve gerekli ısıya bağlı olarak yakıt gazı doğal gaz, propan, hidrojen, metan ya da asetilen olabilir ve hava, sıkıştırılmış hava ya da oksijenle yakılır. Sert lehimde kullanılan şalumolar gaz kaynağında kullanılan şalumolara benzerler ve manuel ya da otomatik olarak kullanılabilirler. Tekli ya da çoklu alev uçları mevcuttur, çoklu uçlar daha büyük ve daha ağır lehimlerde kullanılır. Şalumo lehim esnasında dolgu, bağlantı noktasına halka (boru şeklindeki asambleler için), rondela, şerit, toz şeklinde ya da özel formlarda önceden yerleştirilebilir ya da el ile tutulan tel veya çubuktan beslenebilir. Daima lehim pastası kullanılmalıdır [3,17].

Manuel şalumo lehiminde ısı girişi kontrol edilebildiğinden özellikle eşit olmayan kütleye sahip kesitler için kullanılır. Otomasyon genelde sadece üretim hacmi ve hızı veya geniş asambleler söz konusu olduğunda kullanılır. Manuel sistemler ucuz (yaklaşık 300 \$) ve oldukça portatifken otomasyon esaslı sistemler karmaşıklıklarına bağlı olarak 5.000-50.000 \$ arasındadır [3,17].

3.2.3.2. Fırın lehim

Fırın lehim sadece lehimlenecek parçaların, dolgunun bağlantı üzerine ya da yanına önceden yerleştirilmesiyle asamble edildiği durumlarda kullanılır. Özellikle seri üretimde kullanışlıdır. Önceden yerleştirilmiş dolgu; tel, folyo, talaş, pul, toz, macun ya da şerit şeklinde olabilir. Fırın içinde maskeleme ya da indirgeme amacıyla bir atmosfer kullanılmaması durumunda lehim pastası kullanılır. Hidrojen ve endotermik ya da egzotermik yakılmış gazlar genelde indirgeme (reduction) için kullanılırken soy gazlar (argon ya da helyum) özel durumlarda kullanılır. Vakum atmosferleri de özellikle uçak sanayiinde geniş bir kullanıma sahiptir ve pasta kullanma ihtiyacını ortadan kaldırır. Bununla birlikte vakumlu sert lehim belirli yüksek buhar basıncına sahip dolgu ya da ana malzemelerde kullanılamaz [3,17].

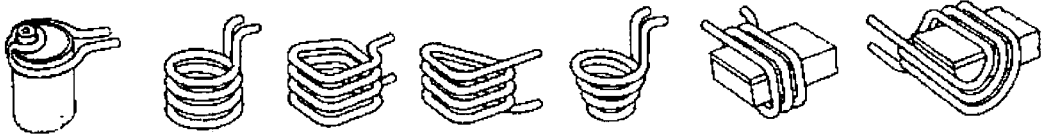
Fırınlr genelde fasıllalı (süreksiz) ya da sürekli tiptedir. Elektriki direnç elemanları, gaz ya da yağ ile ısıtılır ve otomatik zaman ve sıcaklık (ve muhtemelen atmosfer) kontrollerine sahip olmalıdır. Katılaşmanın ve bunu takiben asamblenin soğutulmasının kontrolü ve hızlandırılması için çoğunlukla soğutma odaları ya da zorlanmış atmosfer enjeksiyon soğutması (forced atmosphere injection cooling) kullanılır. Şekil 3.19’da tipik bir fırın lehim işlemini göstermektedir [3,17].



Şekil 3.19. Tipik bir fırın lehim sistemi [3]

3.2.3.3. İndüksiyon lehim

İndüksiyon lehim yönteminde sert lehim için gerekli ısı, lehimlenecek parçalar arasında indüklenen bir elektrik akımından sağlanır. Isıtma sadece sert lehim yapılacak bölge ile sınırlanabileceği gibi daha genel de olabilir. Tipik olarak, yüksek frekanslı alternatif akım taşıyan su soğutmalı bobinler sert lehim yapılacak parçalara çok yakın fakat elektrik devresinin bir parçası olmayacak şekilde yerleştirilir. Şekil 3.20’de indüksiyon lehim bobinleri görülmektedir.



Şekil 3.20. Tipik indüksiyon lehim bobinleri [3]

Sert lehim dolgusu genelde indüksiyon lehim esnasında önceden yerleştirilir ve fırın lehiminde kullanılan dolgulara benzer biçimlerde. Bağlantının tüm elemanlarının tüm yüzeylerinin aynı anda sert lehimleme sıcaklığına ulaşmasını sağlamak için bağlantının dikkatli bir şekilde tasarlanması

ve bobinin dikkatli bir şekilde yerleştirilmesi esastır. Aksi halde dolgu akışı istenen bir şekilde oluşmaz. Bu yöntemde sert lehim pastası kullanılmakla beraber bir atmosfer çoğunlukla bir vakumun kullanıldığı bazı özel durumlar mevcuttur.

İndüksiyon lehimini gerçekleştirmek için kullanılan en yaygın dört yüksek frekanslı alternatif elektrik akımı kaynakları şunlardır:

1. Motor-jeneratörleri (5-10 kHz).
2. Elektrot aralık osilatörleri (20-30 kHz).
3. Vakum tüpü osilatörleri (20-5000 kHz).
4. Katı-hal güç kaynakları (değişken Hz) [17].

Isıtmanın derinliği güç kaynağının frekansı ile belirlenir. Daha yüksek frekanslar daha yüzeysel (derin olmayan) ısıtma oluşturur. Bunun son noktası yüzey ısıtmasıdır. Isıtma oranı oldukça yüksektir ve tipik olarak 10-60 saniye arasındadır. İndüksiyon lehiminde parça kalınlığı genelde incedir ve 3 mm dolaylarındadır [3,17].

İndüksiyon lehimine benzer bir yöntem direnç lehimidir. Bu yöntemde bağlantı, temas yüzeylerinde bulunan bir direnç üzerinden geçen akım ile ısıtılır. Konvansiyonel direnç lehimi makineleri tipik olarak alternatif akımla çalışır.

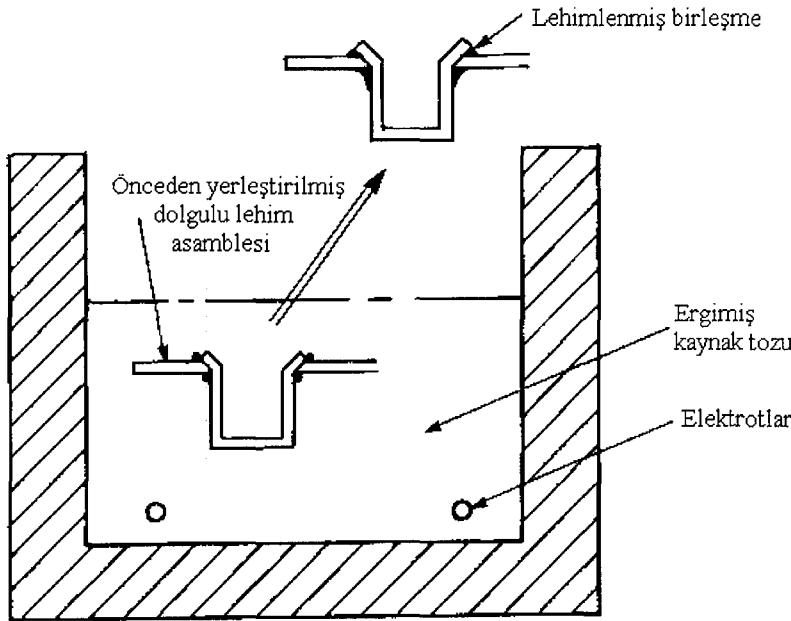
3.2.3.4. Daldırma lehimi

Daldırma lehimi lehimlenecek parçaların uygun bir eriyik banyosuna daldırılmasıyla gerçekleştirilir. İki çeşit daldırma lehimi yöntemi mevcuttur:

1. Kimyasal banyoya daldırılarak yapılan sert lehim.
2. Erimiş metal banyosuna daldırılarak yapılan sert lehim.

Kimyasal banyoya daldırılarak yapılan sert lehimde uygun biçimdeki bir dolgu, bağlantının üstüne ya da yanına önceden yerleştirilir ve asamble erimiş tuz banyosuna daldırılır. Erimiş tuzlar yüksek bir özgül ısı kapasitesine sahiptirler. Bu yüzden sert lehim için gerekli ısıyı tedarik etmek için mükemmeldirler. Ayrıca erimiş tuzlar genelde gerekli temizlemeyi ve oksitlenmeye karşı korumayı sağlayacak kadar aktiftirler. Aksi halde uygun bir sert lehim pastası gerekir. Erimiş metal banyosuna daldırılarak yapılan sert lehimde, lehimlenecek parçalar erimiş sert lehim dolgusu banyosuna daldırılırlar. Parçalar ilk önce temizlenmeli ve gerekirse pastalanmalıdır ve erimiş metal banyosunu oksitlenmeden korumak

için banyonun üstü bir erimiş pasta maskesi ile kaplanmalıdır. Şekil 3.21’de tipik bir daldırma lehim tertibatı görülmektedir [3,17].

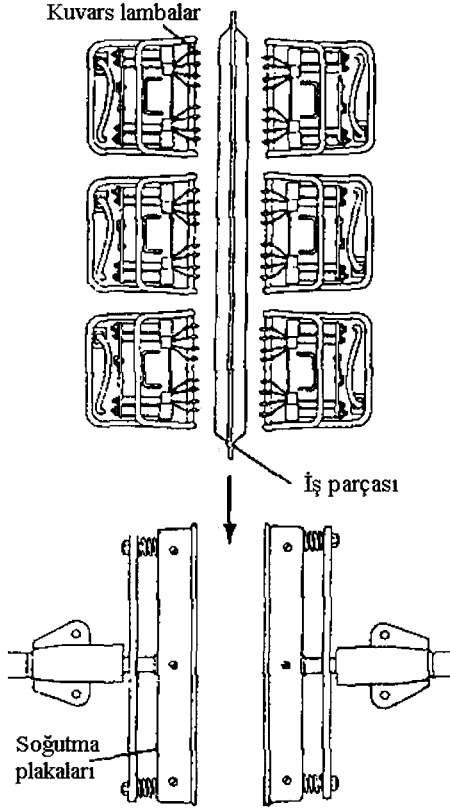


Şekil 3.21. Tipik bir daldırma lehim tertibatı [3]

Daldırma lehim yöntemi düzgün ısı dağılımı sayesinde şalumo lehiminden daha az burulmaya neden olur, fakat daha karmaşık ekipman gerektirir. Küçük parçalarla sınırlıdır ve tüm asamble lehim sıcaklığına ısıtıldığından ve aktif kimyasallara maruz kaldığından, asamble gerekli sert lehim sıcaklıklarına kadar ısıtmaya, korozyif kimyasallara ve sonraki temizleme işlemlerine tahammül edebilmelidir [3,17].

3.2.3.5. Kızılötesi lehim

Kızılötesi lehim yönteminde, gözle görülür tayfa sahip uzun dalga boyundaki ışık ile ısınlama (irradiation) sayesinde oluşan kızılötesi ısıtma yöntemi kullanılır. Çoğunlukla yüksek güçlü (5.000 W) kuvars lambalar kullanılır. Isı geçiş yoğunluğu, kaynak ile iş parçası arasındaki mesafenin karesiyle orantılı bir şekilde azaldığından bu lambalar iş parçasına yakın yerleştirilir. Lambaların parçanın konturunu takip etmesi en iyisi olmakla beraber esas değildir. Isıtma hava, vakum ya da soy gaz atmosferinde gerçekleştirilebilir. Isıtmadan sonra parça kızılötesi kaynaktan çıkarılır ve soğutma plakalarına alınır (şekil 3.22) [3,17].



Şekil 3.22. Kızılötesi lehim [17]

Kızılötesi lehim yöntemi özellikle uçaklardaki bal peteği ve bal peteği sandviçleri gibi çok ince malzemelerin lehimlenmesinde kullanılır. Nadiren yaklaşık 1.3 mm'den daha kalın malzemelerde kullanılır [3].

3.2.3.6. Difüzyon lehimi

Daha önceki sert lehim yöntemlerinden farklı olarak difüzyon lehimi ısı kaynağı yerine birleştirmenin oluşturulmasında kullanılan mekanizma ile tanımlanır. Lehim yapılan asamble, ana ve dolgu malzemelerinin karşılıklı difüzyonuna imkan verecek yeterli bir süre boyunca uygun bir sıcaklıkta tutularak birleştirme oluşturulur. Bağlantıyı dolduran sıvı, dolgunun ergimesi ve akması yerine, dolgu ve ana malzeme arasında sıvı (ötektik) faz oluşturan bir reaksiyondan elde edilir. Bu sayılan nedenlerden dolayı bu yöntem “reaksiyon lehimi” ya da “geçici sıvı faz birleştirmesi” olarak adlandırılır. Sonuçta oluşturulan birleştirme hem dolgu hem de ana malzemeden oldukça farklı bir kompozisyona sahiptir ve birleştirmenin son mikro yapısında hiç dolgu görülmez [3].

Difüzyon lehiminin uygulandığı ana malzemelerin tipik kalınlıkları folyo ile birkaç mm (50 mm'den fazla) arasında değişmektedir. Oldukça ağır parçalar bu yöntem kullanılarak lehimlenebilir, çünkü yöntem birleştirme kalınlığına karşı hassas değildir. Difüzyon lehimini ile yapılan bir çok lehim diğer lehim yöntemleriyle yapmak zor ya da imkansızdır [3].

Difüzyon lehim yöntemi normal sert lehim yöntemlerinden daha sağlam birleştirmeler oluşturur. Çoğunlukla ana malzemenin mukavemetine ulaşılır. Özellikle uç uca ekler ve bindirme ekler mükemmel mekanik özellikler gösterirler. Sert lehim esnasında parçaları bir arada tutmak için fiksörler veya punto kaynağı gerekebilir. Difüzyon kaynağından farklı olarak harici basınca gerek duyulmaz [3].

Difüzyon lehiminin tamamlanabilmesi için uzun bir süre (1/2-24 saat) gerekir, fakat aynı anda birçok birleştirme yapılabilir. Ayrıca difüzyon lehimini ile yapılmış bir birleştirme ana malzemenin ergime sıcaklığına yakın bir tekrar ergime sıcaklığına sahiptir. Böylece servis sıcaklıkları sert lehim yöntemlerinin çoğundan daha yüksektir [3].

3.2.3.7. Diğer özel sert lehim yöntemleri

Özel uygulamalarda kullanılan birkaç özel sert lehim yöntemi daha mevcuttur. Bunlar örtü (rezistans) lehim, egzotermik lehim, lazer lehim, elektron ışın lehim, ultrasonik lehim, mikro dalga lehim, buhar fazı lehim ve basamak lehimidir. Örtü lehiminde basit bir şekilde, yayılım ve iletimin (convection and conduction) bir kombinasyonu ile ısıyı lehime transfer etmek için rezistansla ısıtılmış bir örtü kullanılır. Bu yöntem konturlu parçalar için uygundur. Egzotermik lehim, sert lehim için gerekli ısıyı bir kimyasal reaksiyondan alır. Bu genelde katı fazda ya da katı faza yakın metal-metal oksit reaksiyonlarıdır ($\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Al}$, termit gibi). Bu yöntemin modern bir versiyonu ısıya dayanıklı metallerin, seramiklerin ve ara metallerin (intermetallic) birleştirilmesinde kullanılan kendi kendine yayılan yüksek sıcaklık sentezidir. Bu yöntem endüstride nadiren kullanılmasına rağmen, önceden yerleştirilmiş reaktanların içinde egzotermik kimyasal reaksiyon başlatmak için güneşin ısını kullanarak uzaydaki yapıların birleştirilmesi potansiyeli dikkat çekmektedir. Lazer ve elektron ışın lehim

yöntemleri fotonların ya da elektronların ışınlarını kullanmaktadır. Isıtma yüksek derecede lokaldır ve yöntemler hassas asambleler için uygundur. Elektron ışın yöntemi, ışın oluşumu ve nakli için gerekli vakum altında lehimlenebilen malzemelerle sınırlıdır. Ultrasonik lehim gerçekten ultrasonik destekli bir lehim yöntemidir. Ultrasonik titreşim enerjisi dolgudaki boşlukları ve gaz gözeneklerini temizler, dolguyu ve dolgunun bütünlüğünü iyileştirir. Geliştirilen en yeni ısıtma yöntemlerinden birisi de mikro dalgaların kullanımıdır. Mikro dalga lehim yüksek sıcaklıklı, korozyona dayanıklı ve yüksek performans uygulamalarındaki seramikleri birleştirmek için kullanılır. Bu uygulamalar mukavemetli birleştirmelere sahip karmaşık seramik parçaları gerektirir [3,17].

Buhar fazı lehim ve basamak lehim oldukça özel lehim yöntemleridir. Buhar fazı lehiminde metal buharları buhar halde birleşerek düşük ergime sıcaklığına sahip bir alaşım oluştururlar ve lehimlenecek asamble üzerinde birikerek kılcal etki sayesinde birleşme içine çekilerek bağlantıyı oluştururlar. Bakır ve çinko buharları birleşerek pirinç lehim dolgu alaşımlarını oluştururlar. Basamak lehim gerçekten ardışık lehimler yapmak için kullanılan bir yöntemdir. Derece derece birbirinden daha düşük ergime sıcaklıklarına sahip lehim dolguları seçilerek, tekrar ergimeye neden olmaksızın daha önce yapılanlara yakın sert lehimler yapılabilir.

3.2.4. Uygulama alanları

General Electric tarafından geliştirilen Activated Diffusion Healing (ADH) ve Pratt& Whitney'in Turbofix'i gibi geleneksel difüzyon sert lehim yöntemleri, kanatçıklardaki çatlakların onarılması için havacılık endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntemler çatlak yüzeylerinden oksitlerin temizlenmesi için Florid ve Hidrojen temizlemesine dayanır. Böylece sert lehim yeterince ıslanabilir ve kılcal kuvvetlerle çatlak yüzeylerine sızar. Mamul parçalarda her zaman yeterli temizleme sağlanamaz ve bunun bir sonucu olarak tamirlerin kalitesi ve performansı tutarsızdır [9].

Liburdi Powder Metallurgy (LPM) yöntemi arzu edilen mekanik ve metalürjik özelliklere ulaşabilmek için kusurların kaynağına benzer bir şekilde mekanik olarak giderilmesini ve daha sonra toz metal işleme macunu kullanılarak

tamir edilmesini sağlayan hibrit bir işlemdir. Sonuçta ortaya çıkan metalürjik bağ, ana metale mükemmel bir difüzyon sağlar ve önceki toz tanecikleri ve mikro yapıdan eser kalmaz. LPM yöntemi 1987'den beri gaz türbinli motorların pale ve kanatçık tamirlerinde kullanılmaktadır [9].

3.3. HİBM'nde F110-GE-100/129 Motoruna Uygulanan Kaynak ve Sert Lehim İşlemleri

HİBM Jet Revizyon Müdürlüğü'nde, yapılan kontroller sonucunda hasarlı oldukları belirlenen F110-GE-100/129 motorlarının komponentlerine kaynak ve sert lehim yöntemleri kullanılarak bir takım yenileme işlemleri uygulanmaktadır.

En yaygın kullanım alanına sahip kaynak yöntemleri gaz tungsten ark kaynağı (TIG) ve elektron ışın kaynağıdır. Bu kaynak yöntemleri motorun HPT palelerinde, HPT nozul kanatçıklarında, yanma odası komponentlerinde (combustion chamber dome ve combustion chamber inner liner), ön çerçevede (front frame), fan stator dış kaplamasında (fan stator casing) vb. elemanlarda genelde çatlakların onarılmasında kullanılır.

TIG kaynağı işlemlerinde kullanılan elektrot tungsten elektrottur ve 1.5875-3.175 mm (1/16-1/8 inç) çapa sahiptir. %2 zirkon dioksit ya da saf tungsten içerir. Koruyucu gaz olarak 0.28-0.42 m³/sa 'lık (10-15 ft³/sa) akış oranına sahip argon kullanılır. Daha derin penetrasyonun gerektiği uygulamalarda ise koruyucu gaz olarak helyum kullanılır. Kaynak yapılacak çatlığa göre kullanılacak elektrot çapı belirlenir. TIG kaynağında yüksek frekanslı akım kullanılır ve malzemenin metal kalınlığına bağlıdır. 3.175 mm'ye (1/8 inç) kadar olan metal kalınlıkları için inç cinsinden metal kalınlığının 1000 katı kadar akım şiddeti kullanılır. Örneğin 0.045 inç kalınlığındaki metal için 45 amperlik akım kullanılır (1000 x 0.045 = 45). 3.175 mm'den (1/8 inç) daha kalın metaller için kullanılan akım değeri 125 amperdir. Helyum gazı kullanıldığında akım %25-33 azaltılmalıdır.

Şekil 3.23-3.26'da kaynak işlemi görmüş bazı motor parçaları Şekil 3.27'de ise elektron ışın kaynağı makinesi görülmektedir.



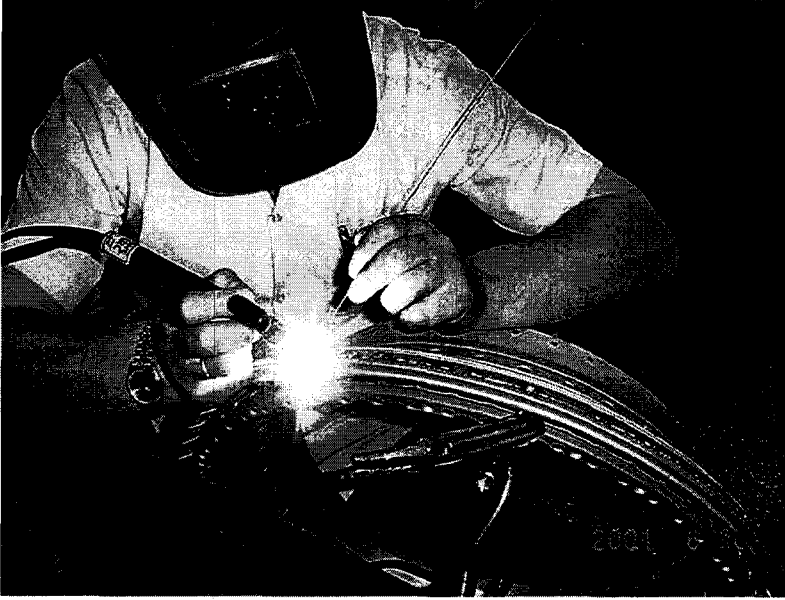
Şekil 3.23. HPT palesi



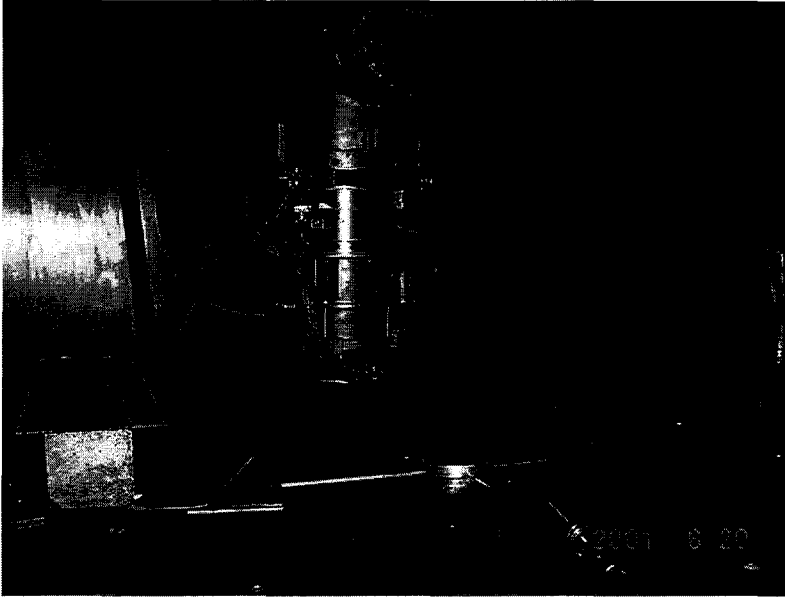
Şekil 3.24. HPT nozul kanatçığı



Şekil 3.25. Yanma odası (dome)

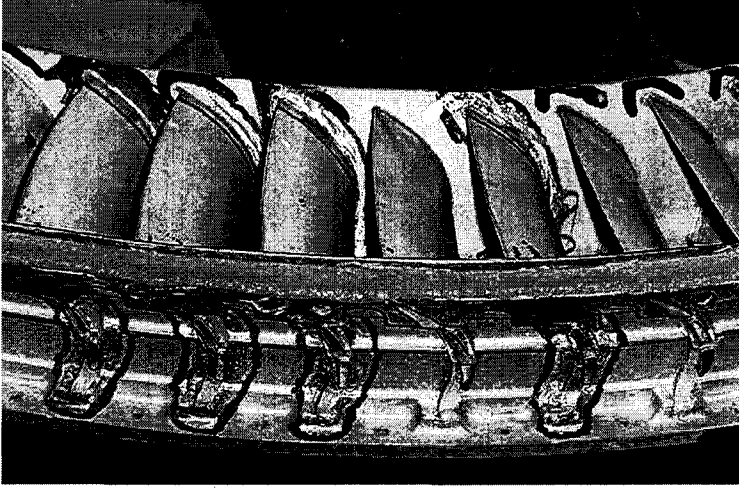


Şekil 3.26. Yanma odası (inner liner)

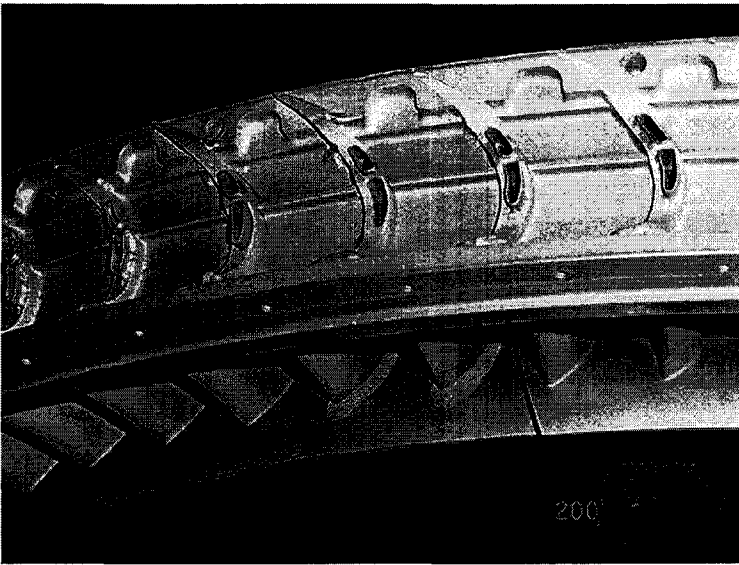


Şekil 3.27. EBW makinesi

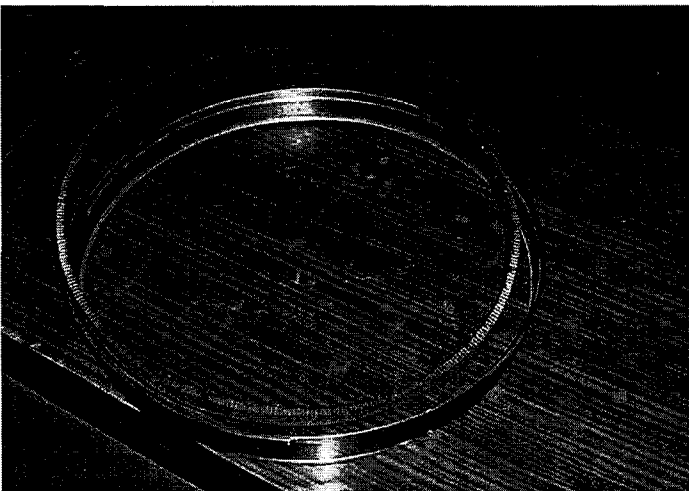
Bunların yanında LPT nozulu, bal peteği contalar (honeycomb air seal) vb. komponentlere fırın lehim tekniği kullanılarak sert lehim işlemleri uygulanmaktadır. Hasarlanmış LPT nozul kanatçıları çürütülerek yenileri General Electric patentli Activated Diffusion Healing yöntemi kullanılarak takılmaktadır. Şekil 3.28 ve 3.29’da sert lehim işlemi görmüş LPT nozulları, 3.30’da ise pal peteği conta görülmektedir.



Şekil 3.28. LPT nozulu



Şekil 3.29. LPT nozulu



Şekil 3.30. Pal peteği conta (honeycomb seal)

4. GELİŞMİŞ İŞLEME YÖNTEMLERİ

Metal işleme endüstrisinde takım tezgahları geleneksel ve gelişmiş olmak üzere ikiye ayrılır. Tornalama, frezeleme, taşlama gibi geleneksel operasyonlarda elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülür. Daha sonra bu mekanik enerji kesme takımları veya aşındırıcı tanecikler üzerinden iş parçasına uygulanır. Parçaları belirlenen şekil ve boyutta biçimlendirmek için metalin kaldırılmasında, kaldırılan metal talaş oluştururken plastik deformasyona uğrar ve iş parçasında ısı ve gerilmeye neden olur. Gelişmiş yöntemlerde metal, elektrik enerjisinin iş parçasına doğrudan uygulanmasıyla kaldırılır. Bu yöntemler; Elektrokimyasal İşleme (ECM), Elektriki Aşındırmayla İşleme (EDM), Elektrokimyasal Taşlama (ECG) ve Lazer Işınıyla İşleme (LBM)'dir [10,18,19].

Çalışmanın bu bölümünde adı geçen gelişmiş işleme yöntemleri tanıtılmış ve jet motorlarında parça yenileme işlemi olarak uygulama alanları verilmiştir.

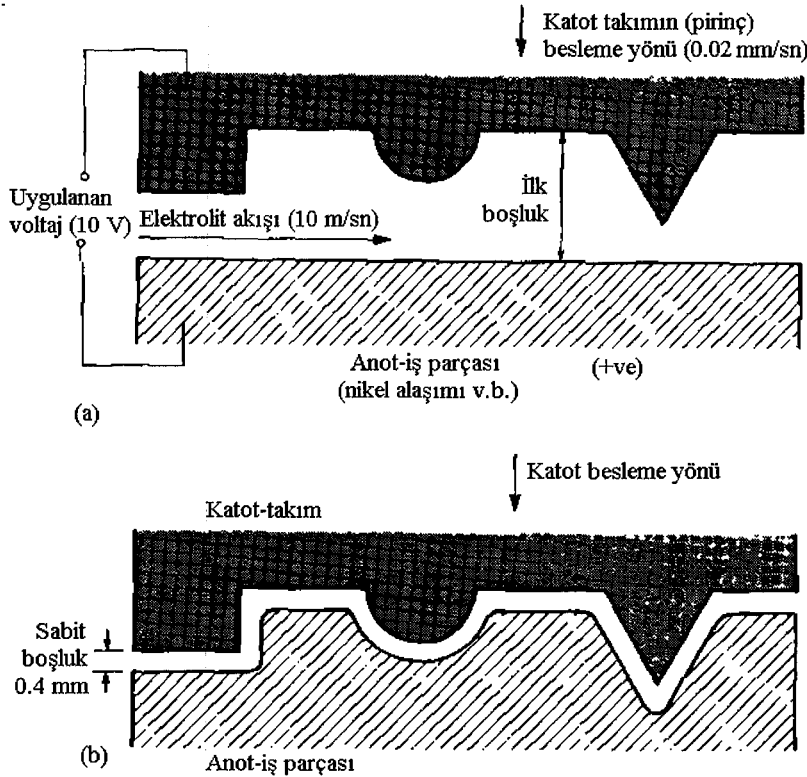
4.1. Elektrokimyasal İşleme (ECM)

Elektrokimyasal işleme, bir iş parçasının yüzeyinden atomların kaldırılmasına dayanan gelişmiş bir işleme yöntemidir. Bu işleme yönteminde elektroliz teknikleri kullanılır. ECM yönteminde yüksek akım şiddetli ve düşük voltajlı bir doğru akım iş parçası (anot) ile şekillendirilmiş takım (katot) arasından geçirilir. Anodik iş parçası yüzeyindeki metal iyonlarına ayrışır ve böylece takımın şekli iş parçasına kopyalanır. Elektrotlar arasındaki boşluktan akan elektrolit, metal iyonlarını ve oluşan ısıyı kaldırır. Takım iş parçası içine doğru ilerletilerek anot ile katot arasındaki boşluk korunur. Anot metali elektrokimyasal olarak çözündüğünden, çözünme hızı Faraday Kanunu'na göre sadece atomik ağırlığına, birleşme değerine, geçen akıma ve akımın geçtiği süreye bağlıdır. Çözünme hızı metalin sertliğinden ya da diğer özelliklerinden bağımsızdır. Katotta sadece hidrojen gazı olduğundan, bu elektrotun şekli elektroliz boyunca değişmez. Bu özellik ECM'in metal işleme yöntemi olarak kullanılmasındaki en önemli etkidir [7,16,18,20,21,22].

ECM yöntemindeki ilk önemli gelişmeler 1950'li yıllarda, ECM ile geleneksel yöntemlerle işlenemeyen yüksek mukavemetli ve ısıya dayanıklı alaşımların işlenmesinin mümkün olduğunun fark edilmesiyle başlamıştır. Şu anda ECM otomotiv sektöründen tıp sektörüne kadar geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Fakat ilk ve en önemli kullanıcısı havacılık sektörüdür.

4.1.1. Temel prensipler

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi iş parçası ve takım bir elektrolit bataryanın anot ve katodunu oluşturur.



Şekil 4.1. ECM için katot-takım ve anot-iş parçasının ilk (a) ve son (b) durumları [16]

Genelde 10-30 V civarlarında sabitlenmiş bir potansiyel fark tatbik edilir. Uygun bir elektrolit seçilir. Böylece elektroliz boyunca katodun şekli değişmez. İşleme ürünlerini temizlemek, katodik gaz oluşumu ve elektriki ısınma ile yükselen istenmeyen etkilerin azaltılması amacıyla elektrotların arasındaki boşluktan iletkenliği yaklaşık 0.2 W/cm olan elektrolit yaklaşık 3-60 m/sn hızla pompalanır. Anottan metal kaldırma hızı yaklaşık olarak elektrotlar arasındaki mesafenin tersiyle orantılıdır. Katodun anoda doğru yaklaşık 0.02-0.03 mm/sn'lik bir besleme hızıyla işleme devam etmesi ile elektrotlar arasındaki açıklık sabit bir

değere ulaşır. Bu şartlar altında katot şeklinin kabaca simetriği (tamamlayıcısı) anot üzerinde oluşur. Tipik elektrot aralığı 0.025-1.3 mm, ortalama akım şiddeti de 20-300 A/cm²'dir. Eğer sert bir malzemeden yapılmış iş parçası üzerinde karmaşık bir şekil işlenecekse ilk önce tamamlayıcı şekil daha yumuşak bir malzemeden yapılmış katot üzerinde işlenir ve daha sonra ikinci elektrot elektrokimyasal olarak iş parçasını işlemekte kullanılır [7,16,18,22].

Katot olarak kullanılacak metal elektriki ve ısı iletkenliğe sahip olmalı, elektrolite karşı kimyasal dirence sahip olmalı ve ECM için gerekli sertliğe ve işlenebilme özelliğine sahip olmalıdır. Bakır, pirinç, bronz, paslanmaz çelik ve titanyum ECM takımları olarak en çok kullanılan malzemelerdir. Elektriki geçiren neredeyse tüm malzemelerden yapılmış iş parçaları elektrokimyasal olarak işlenebilir. ECM; titanyum, Rene 95, Rene 88 ve IN100 gibi en sert yüksek sıcaklık alaşımlarında bile etkin bir şekilde kullanılabilir [22,23,24].

Elektrolit anot ile katot arasında devreyi tamamlayan iletken bir sıvıdır. Elektrolitler temelde inorganik bileşiklerin sıvı solüsyonlarıdır ve anotta iş parçasını çözündürme yeteneğine sahip olmalıdır. Yüksek elektriki iletkenlik, özgül ısı, ısı iletkenlik ve kaynama noktası elektrolitlerin temel özellikleridir. Fakat bunlara ilaveten metal alaşımları, 1818 paslanmaz çelik veya titanyumdan yapılan pompa ve ilgili ekipmanda korozyona neden olmamalıdır. ECM tezgahı mümkün olan en az sayıda parçanın elektrolite ya da elektrolit buharına maruz kalacak şekilde tasarlanmalıdır. Çelik veya nikel alaşımlarını işlemek için içine bir miktar sülfürik ya da hidroklorik asit katılmış %24'lik bir sodyum klorid solüsyonu bir elektrolit için baz oluşturabilir. Gaz türbinli motorların pale ve kanatçıklarına uygulanan ECM işlemlerinde genelde sodyum nitrat kullanılır. Çizelge 4.1'de çeşitli metallerin elektrokimyasal olarak işlenmesinde kullanılan elektrolitler listelenmiştir [7,22,23].

Çizelge 4.1. Çeşitli metallerin ECM işlemlerinde kullanılan elektrolitler [22]

İş parçası malzemesi	Elektrolit	İşleme hızı mm ³ x10 ³ /dk/1000 A
Çelik; demir, nikel ve kobalt bazlı alaşımlar	NaCl ya da KCl	2.1
	NaNO ₃	2.1
Çelik ve sertleştirilmiş çelik	NaClO ₃	2.1

Çizelge 4.1. Çeşitli metallerin ECM işlemlerinde kullanılan elektrolitler (devam)

İş parçası malzemesi	Elektrolit	İşleme hızı $\text{mm}^3 \times 10^3 / \text{dk} / 1000 \text{ A}$
Gri demir	NaCl	2.0
	NaNO_3	2.0
Beyaz döküm demir	NaNO_3	2.0
Alüminyum ve alaşımları	NaNO_3	2.1
	NaCl ya da KCl	2.1
Titanyum alaşımları	NaCl ya da KCl	1.6
Tungsten	NaOH	1.0
Molibden	NaOH	1.0
	NaCl ya da KCl	1.0
Bakır ve alaşımları	NaCl ya da KCl	4.4
	NaNO_3	3.3
Zirkon	NaCl ya da KCl	2.1

ECM’de sıradan işleme yöntemlerinde görülen talaş oluşturma olayı yoktur. Fakat iş parçasındaki metallerin tuzları ya da hidroksitleri elektrolit içine karışacağından, bunlar kimyasal ayrıştırma ile temizlenmelidir. Elektrolit, takım ile iş parçası arasından akıtılmadan önce ince gözlü bir ağ filtreden geçirilmelidir. Böylece bir kıvılcım oluşturabilecek ve gerilme konsantrasyonları ya da çatlaklara neden olarak iş yüzeyine hasar verebilecek parçacıklar ayrılmış olur.

Şekil 4.2’de yukarıda çalışma prensipleri verilmiş bir endüstriyel ECM makinesi görülmektedir. Şekil 4.2.a’da küçük bir 500 amperlik makine görülmektedir. Bu makine küçük parçaların işlenmesi (çapak alma ve delik delme) için uygundur. Bu tür bir makinenin komponentleri şekil 4.2.b’de verilmiştir. ECM makinesinin takım tezgahının ve işleme tablasının stabilizesine çok dikkat edilmelidir. Elektrolit işleme ürünlerinin arındırılması için dikkatli bir şekilde filtre edilmelidir. Elektrolit rezervuar içinde 30°C gibi sabit bir sıcaklıkta tutulur. Bu yöntem sabit çalışma şartları sağlar. Çünkü işleme esnasında elektrolit, içinden akım geçtiği için ısınır. Eğer önlem alınmazsa yüksek sıcaklık elektrolitin özgül iletkenliğinde büyük değişimlere neden olur. Bunun sonucu olarak işleme hassasiyetinde istenmeyen etkiler görülür [16].

5. Sert ya da yumuşak herhangi bir iletken malzemede kullanılabilir.
6. Takım iş parçasına asla temas etmediğinden iş parçasına zarar verme tehlikesi yoktur.
7. Takımda ve iş parçasında birikmiş gerilme (residual stress) ve termal yorulma yoktur.
8. İş parçasında çapak oluşmaz.

Bu avantajların yanında ECM'in birtakım dezavantajları da vardır.

Bunlar şu şekilde özetlenebilir:

1. ECM makineleri, kurulması, bakımı ve takımların üretimi çok pahalıdır.
2. Elektrolitin iyi bir şekilde depolanması gerekir. Örneğin sodyum klorid (en çok kullanılan elektrolit) ekipmanda, takımda ve iş parçasında korozyona neden olabilir. Ayrıca asit ve alkali içeren solüsyon atıkları çevreye zarar vermeyecek şekilde depolanmalıdır [7,16,20,21].

4.1.3. İşleme hızı

Metallerin elektrokimyasal olarak hangi hızla işlenebileceklerini hesaplamak için Faraday Kanunu kullanılabilir:

$$m = \frac{A}{z} \cdot \frac{I \cdot t}{F} \quad (4-1)$$

Burada m (mg), I (A) akımının t (sn) zamanında geçmesiyle elektrokimyasal olarak işlenen metal kütlelerini verir. A çözünen iyonların atomik ağırlığı, z iyonların birleşme değeri ve F de Faraday sabiti (96500 C)'dir. A/zF 'nin değerine anot metalin elektrokimyasal eşdeğeri denir.

Çizelge 4.2'de ECM'de 1000 A'lık bir akımın kullanılması halinde elde edilebilecek işleme hızları verilmiştir. Metal kaldırma hızları, hacimsel işleme hızının yanında kütleli kaldırma hızı olarak da verilmiştir. Bu çizelgedeki değerler verimin %100 olduğu, yani ECM'deki tüm akımın metali kaldırmak için kullanıldığı varsayılarak belirlenmiştir. Bazı metallerin hangi birleşme değeri ile çözüneceklerini ya da elektrotlar arasındaki boşluktan ne kadar akım geçeceğini

önceden belirlemek her zaman mümkün değildir. Ayrıca elektrot şekli gibi bazı uygulama faktörleri de akım geçişini sınırlayabilir.

Örneğin nikel düşük akım yoğunluklarında (25 A/cm^2) %100'lük bir akım veriminde işlenebilir. Akım verimi deneysel metal kaldırma hızının teorik hıza yüzde oranı olarak tanımlanır. Eğer akım yoğunluğu arttırılırsa (örneğin 250 A/cm^2) anottaki diğer reaksiyonların (oksijen gazı oluşumu gibi) başlamasından dolayı verimin %85-90'lara düştüğü görülür. Eğer titanyum, sodyum klorid elektrolit içinde elektrokimyasal işlenmeye olarak çalışılırsa %10-20 civarlarında çok düşük bir akım verimi elde edilir. Bu solüsyon yerine florid bazlı elektrolitlerin bir karışımı kullanıldığında daha yüksek verimler elde edilebilir. Fakat bu arada metalin yüzeyinde oluşan inatçı oksit filminin kırılmasına yardımcı olmak için voltajın da yükseltilmesi (yaklaşık 60 V) gerekir. İlginçtir ki bu film titanyumun korozyona karşı direncini arttırır. Korozyon direnci sertlik ve hafiflikle birleştiğinde titanyumu uçak motor endüstrisinde son derece kullanışlı bir metal yapar [16].

Çizelge 4.2. Elektrokimyasal işlemedeki teorik işleme hızları [22]

Metal	Birleşme değeri	Yoğunluk, gr/cm^3	İşleme hızı, 1000 A akım, %100 verim	
			Kütle, kg/sa	Hacim, $\text{mm}^3 \times 10^3/\text{dk}$
Alüminyum	3	2.7	0.34	2.1
Berilyum	2	1.9	0.17	1.5
Bakır	1	9.0	2.37	4.4
	2	9.0	1.18	2.1
Demir	2	7.9	1.04	2.3
	3	7.9	0.69	1.5
Magnezyum	2	1.7	0.45	4.4
Molibden	3	10.2	1.19	2.0
	4	10.2	0.89	1.5
	6	10.2	0.60	1.0
Nikel	2	8.9	1.09	2.1
	3	8.9	0.73	1.3
Neobiyum	3	8.6	1.16	2.3
	4	8.6	0.87	1.6
	5	8.6	0.69	1.3
Tantal	5	16.6	1.35	1.3
Titanyum	3	4.5	0.59	2.1
	4	4.5	0.45	1.6
Tungsten	6	19.3	1.14	1.0
Alaşımlar				
4340	....	....	....	2.18
17-4 PH	....	....	....	2.02
A-286	....	....	....	1.92
M-252	....	....	....	1.80
René 41	....	....	....	1.77

Çizelge 4.2. Elektrokimyasal işlemedeki teorik işleme hızları (devam)

Metal	Birleşme değeri	Yoğunluk, gr/cm ³	İşleme hızı, 1000 A akım, %100 verim	
			Kütle, kg/sa	Hacim, mm ³ x10 ³ /dk
U-500				1.80
U-700				1.77
L-605				1.75

Eğer elektrolit akış hızı çok düşük tutulursa işleme ürünleri elektrotların arasından süpürülemeyeceğinden, elektrokimyasal olarak en kolay işlenebilen metallerin bile akım verimi düşer. Çöküntülerin aralığın içinde birikmesi metalin daha fazla çözünmesini engeller ve katodik olarak meydana gelen gaz iş parçası ile takım arasında kısa devreye neden olur. Eğer besleme mekanizması durdurulmazsa işleme son bulabilir ve her iki elektrot da zarar görebilir. Gerçekten yeterli elektrolit akışını sağlamak için uygun akış kanallarının eklenmesiyle, işleme etkin bir şekilde sağlanabilir.

Çizelge 4.2’de saf metaller ve bazı yaygın alaşımlar için işleme hızlarıyla ilgili veriler bulunmakla beraber herhangi bir alaşım için de işleme hızı hesaplanabilir. Tüm bu işlemler alaşımın kimyasal eşdeğeri için etkin bir değer hesaplanmasına dayanır. Örneğin uçak endüstrisinde kullanılan tipik bir nikel alaşımı olan Nimonik 75 için 25.1’lik bir kimyasal eşdeğer aşağıdaki ifadeden çekilebilir:

$$\text{Alaşımın kimyasal eşdeğeri} = \left\{ 100 / \left[\frac{X_A}{A_A / Z_A} + \frac{X_B}{A_B / Z_B} + \dots \right] \right\} \quad (4-2)$$

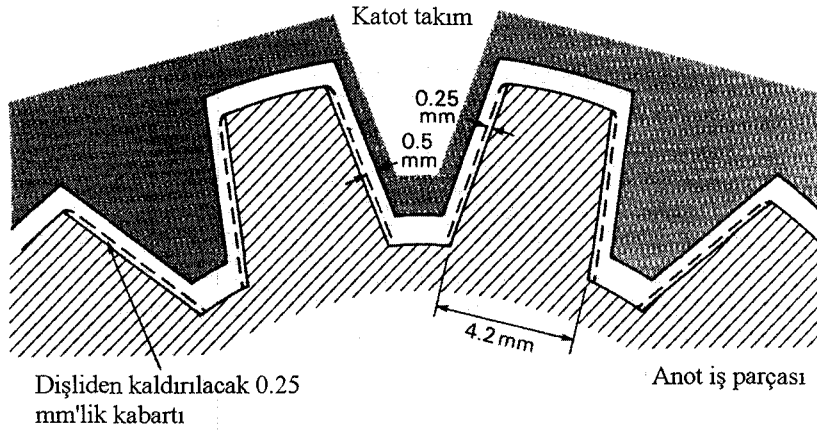
Burada A, B, ... alaşım içindeki %X miktarında bulunan elementleri simgeler. (Nimonik alaşımı yüzde ağırlık olarak 72.5 Ni, 19.5 Cr, 5.0 Fe, 0.4 Ti, 1.0 Si, 1.0 Mn, 0.5 Cu’dan oluşur) [16].

4.1.4. ECM’in uygulama alanları

Elektrokimyasal işleme, uçak motor endüstrisinde genelde imalatla kullanılır. Bunlara örnek olarak türbin paleleri, pale diskleri gibi geleneksel yöntemlerle işlenmesi güç motor parçaların şekillendirilmesi verilebilir. Yenileme işlemlerinde ise en yaygın kullanım alanı çapak alma (pürüzlü yüzeylerin düzeltilmesi) ve delik delme işlemleridir [16,18,20,21,22].

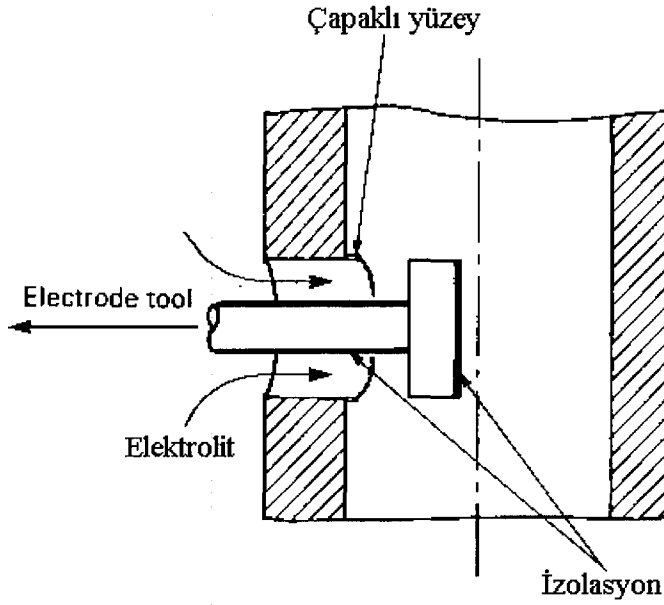
4.1.4.1. Çapak alma

ECM'in en basit ve en yaygın uygulaması çapak almadır ve şekil 4.3'de bir örneği görülmektedir. Burada şekil olarak tamamlayıcı bir katot takımı, yüzeyinde 0.25 mm yüksekliğinde pürüzlere sahip bir iş parçasının karşısına yerleştirilmiştir. Yüzey pürüzlerinin tepesindeki akım yoğunluğu diğer tüm bölgelerdekenden daha yüksektir. Bu nedenle bu pürüz tepeleri tercihli olarak kaldırılır ve iş parçasının yüzeyi düzgün bir hale getirilir. Bu uygulamada 12 V 25A'lık bir akım kullanılarak pürüzden yaklaşık 3 saniyede 0.008 mm metal kaldırılır. 30°C'de %30 ağırlık oranına sahip NaNO_3 kullanılmıştır [16].



Şekil 4.3. ECM ile çapak alma [16]

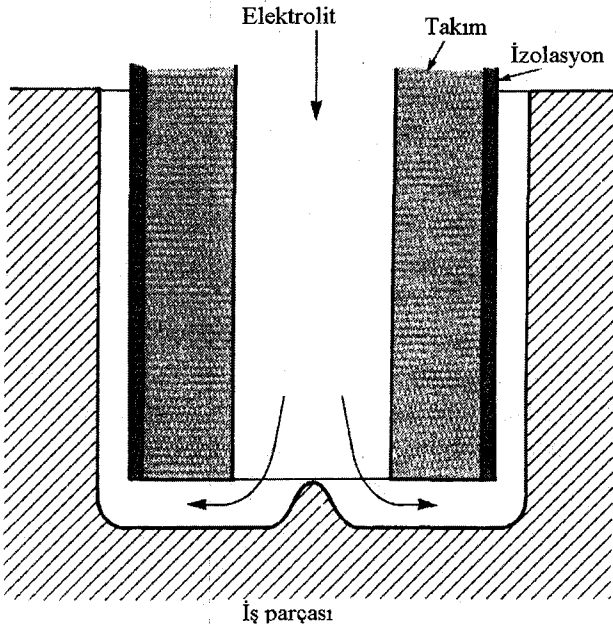
Elektrokimyasal çapak alma hızlı bir işlemdir. İmal edilmiş veya yenileme işlemi görmüş (kaynak vb.) komponent yüzeylerinin düzeltilmesi için tipik işlem süresi 5-30 sn'dir. Hızı ve kullanım kolaylığından dolayı elektrokimyasal çapak alma, sabit bir katot takımı ile gerçekleştirilebilir. İşlem bir çok uygulamada kullanılır ve enine delinmiş deliklerin ara kesit bölgesinin çaptan arındırılması için özellikle uygundur (şekil 4.4). Yüzeydeki pürüzlerin giderilmesi için geliştirilen elektrokimyasal parlatma işlemi ile yüzey pürüzlülüğü 0.05 μm 'den daha küçüktür [16,22].



Şekil 4.4. Enine delinmiş delikte elektrokimyasal çapak alma işlemi [16]

4.1.4.2. Delik delme

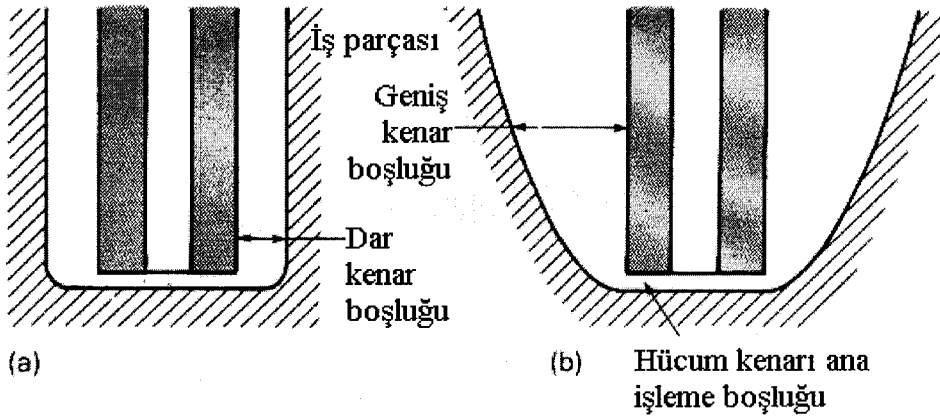
Delik delme ECM'in kullanıldığı bir diğer yaygın işlemdir. Şekil 4.5'de katot takımı olarak boru şeklinde bir elektrot kullanılır. Elektrolit takımın merkez deliğinden pompalanır ve takımın çeperi ile iş parçası içinde elektrolitik olarak çözünen delik arasında oluşan kenar boşluğu arasından akar.



Şekil 4.5. Elektrokimyasal delik delme işlemi [16]

Ana işleme olayı delme takımının hücum kenarı ile iş parçası içindeki deliğin tabanı arasında oluşan elektrotlar arası boşlukta gerçekleşir.

Elektrokimyasal işleme ayrıca takımın yan çeperleri ile komponent arasında yanal olarak da gerçekleşir. Yanal boşluk genişliği takım hücum kenarındakinden daha büyük olduğundan yan ECM hızı daha düşüktür. Yan ECM'in tüm etkisi oluşturulan deliğin çapını büyütmektedir. İş parçasının yan çeperi ile katot takımının merkez eksenindeki radyal uzunluk ile katodun dış çapı arasındaki yerel fark "aşırı kazıma" (overcut) olarak bilinir. Aşırı kazıma miktarı çeşitli yollarla azaltılabilir. Oldukça yaygın bir metot, elektrolitin akış yönünü ters çevirmektir. Yani elektroliti katot takımının dış çeperleri arasından aşağı pompalayarak merkez deliğinden yukarı çıkarmaktır. Bu işlem elektrolizin gaz halindeki ürünlerini yan boşluğa ulaşmadan önce işleme bölgesinden arındırır. Aşırı kazıma ayrıca aletin dış çeperlerinin elektriki izolasyonu ile da azaltılabilir. Elektriki izolasyon sayesinde yan akım akışı durdurulmuş olur. Aşırı kazımayı azaltmanın üçüncü bir yolu da sodyum nitrat gibi bir elektrolit seçmektir. Bu tür elektrolitler akım yoğunluğunun yüksek olduğu hücum kenarlarında yeterli metal kaldırma hızı sağlarken, akım yoğunluğunun düşük olduğu yan boşluklarda bu oran daha düşüktür (şekil 4.6) [16].

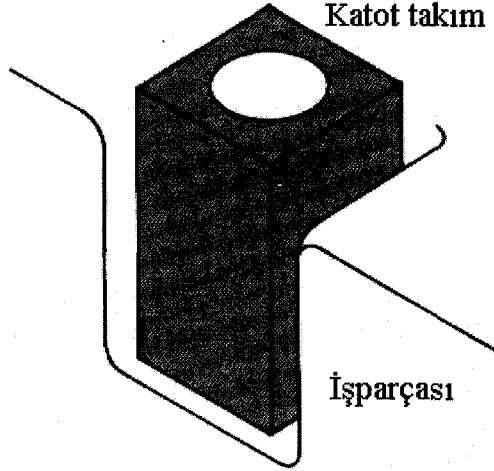


Şekil 4.6. a) Sodyum nitrat elektrolitteki aşırı kazıma [16]
b) Sodyum klorit elektrolitteki aşırı kazıma [16]

ECM ile delme yuvarlak deliklerle sınırlı değildir. İş parçasının şekli takım elektrot tarafından belirlendiğinden herhangi bir kesite sahip bir katot, iş parçasında tamamlayıcı bir şekil üretecektir (şekil 4.7).

ECM ile delme ve yüzey düzgünleştirme işlemleri arasındaki fark kayda değerdir. Delme işleminde, iş parçasıyla delici takımın hücum kenarı arasındaki ana işleme bölgesinde sabit bir denge boşluğu (aralığı) sağlamak için

elektrotlardan birisinin, örneğin takımın diğerine doğru mekanik bir hareketle ilerlemesi gerekir. Düzgünleştirme işleminde ise takımın mekanik hareketine genelde gerek yoktur. ECM ile delme işleminde tipik besleme hızı 1-2 mm/dk'dır [16].



Şekil 4.7. Kare kesitli katot ve açtığı kare kesitli delik [16]

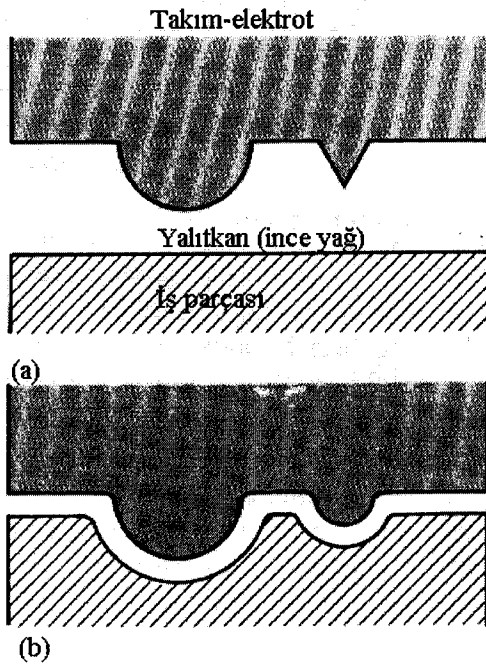
ECM ile çok değişik boyutlarda delikler delmek mümkündür. 0.05 mm'den 20 mm çapa kadar delikler rapor edilmiştir. Elektrokimyasal delme işlemi ile elde edilen yaygın sonuçlar 0.001 mm konik, 0.5 mm aşırı kazılmış ve 2.5 mm köşe yarıçapına sahip deliklerdir. ECM ile iç çapı 0.8 mm'den ve dış çapı da 0.5 mm'den küçük parçaları işlemek zordur [16,22].

4.2. Elektriki Aşındırmayla İşleme (EDM)

Elektriki aşındırmayla işleme (EDM), iki elektrodun kıvılcım oluşturmak için kullanıldığı bir metal kaldırma işlemidir. Anot (pozitif elektrot) iş parçasıdır. Katot (negatif elektrot) da istenen detayın simetriği şeklinde biçimlenmiş takımdır. Elektrotlar asla birbirleriyle temas etmezler ve her zaman aralarında tipik olarak 0.001-0.5 mm'lik bir boşluk bulunur. Elektrotlar oluşturulacak elektrik deşarjına yardımcı olan, takımı soğutan ve atık ürünleri temizleyen yalıtkan bir sıvı içine daldırılmıştır. Yalıtkan sıvının direnci, deşarjların frekansını belirlediğinden iyi bir yüzey kalitesi elde etmek için çok önemlidir [16,18,20,25].

Kıvılcım deşarjları, elektrotlara bağlanan ve yalıtkan sıvının içinden geçerek onu iyonize eden bir DC güç kaynağı tarafından oluşturulur. Akım genelde 5 kHz dolaylarında frekansa sahip dikdörtgen formudur ve 80-130 V,

0.1-1000 A dolaylarında ve sadmelidir. Termal enerji lokal ısı şeklinde oluşur ve sıcaklıklar 12000°C'ye ulaşır. Bu sıcaklık malzemeyi eritecek ve buharlaştıracak kadar yüksektir. 10^{17} W/m²'ye kadar yükselen ısı akışları sayesinde çok kısa süreli (0.1-2000 μ s tipiktir) kıvılcımlarla bile elektrotların sıcaklıkları bölgesel olarak (10 μ m'lik bir ϕ içinde) normal kaynama sıcaklıklarından daha fazla yükseltilebilir. Takım da iş parçası gibi yüksek sıcaklıklara maruz kaldığından takım da aşınma görülür. Takım aşınması, kaldırılan iş parçası malzemesinin kaldırılan takım malzemesine oranı şeklinde ölçülür ve büyük ölçüde kullanılan iş parçası ve takım malzemesine bağlıdır. İş parçasındaki metal erozyonu %99.5'e kadar yükselirken takımdaki aşınma %0.5 kadar küçük bir değerde tutulur. Şekil 4.8'de EDM'in basit bir şekli görülmektedir [16,18,20,25].

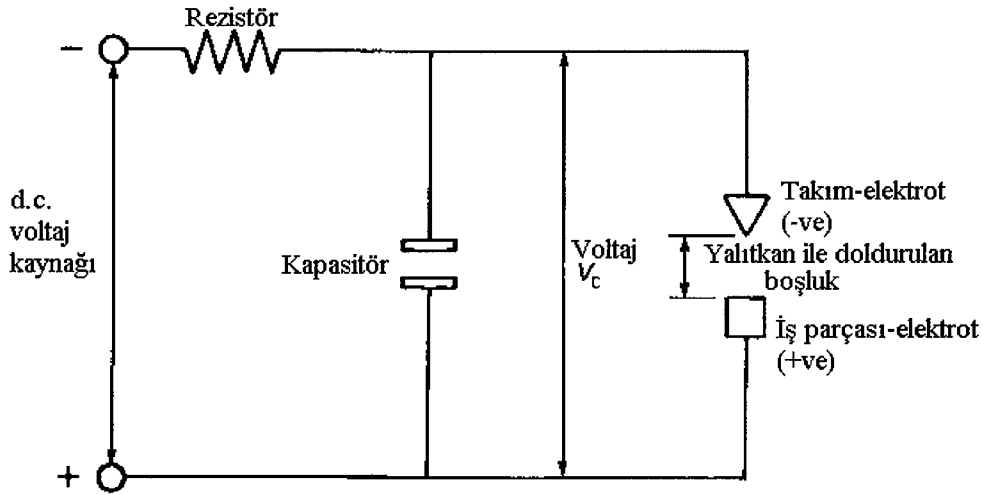


Şekil 4.8. a) Elektrot ve iş parçasının ilk şekilleri [16]
b) Elektrot ve iş parçasının son şekilleri [16]

Elektrotlarda kullanılan en yaygın malzemeler grafit, bakır, pirinç, paslanmaz çelik, titanyum, bakır tungsten, gümüş tungsten ve bakır grafitir. Yalıtkan sıvı olarak da genelde arıtılmış su, kerozen gibi hidrokarbon yağlar ve parafin kullanılır [16,18,20,25].

4.2.1. Temel Prensipler

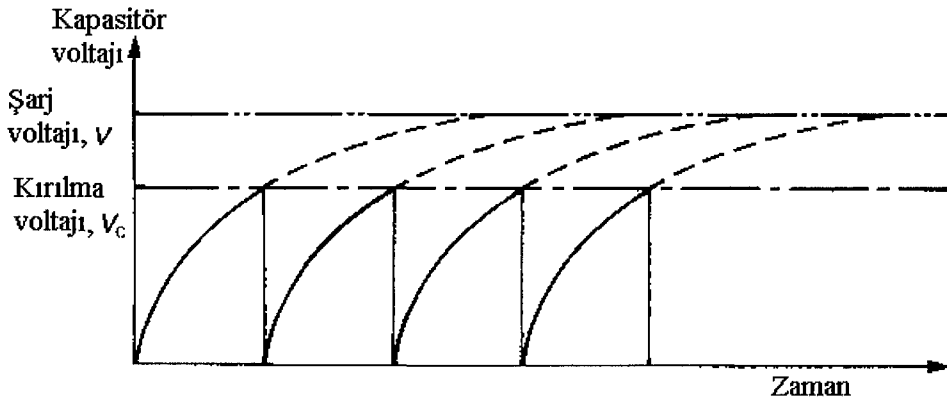
1943 yılında iki Rus bilim adamı B.R. ve N.I. Lazarenko [16] anahtar (switch) kontaklarındaki aşınmayı incelerken kıvılcım deşarjlarının mevcut yöntemlerle işlenmesi güç olan yeni geliştirilmiş malzemelerin işlenmesinde kullanılabileceğini düşünmüşlerdir. O zamana kadar düşük frekanslı ark deşarjları kırık saplamaların çürütülmesi gibi yerlerde kullanılmıştır. Bu işlemde periyodik olarak birbirine değerek sonra ayrılan bir elektrotla iş parçası arasında bir voltaj uygulandığında bir ark oluşmaktadır. Yüzey kalitesi kötüdür. Yüzey detaylarının taklidi yoktur ve deşarj enerjisinin çoğu, oldukça geniş bir alana yayıldığından, ziyan olmaktadır.



Şekil 4.9. Rahatlama (RC) devresi [16]

Bu yönteme alternatif olarak Lazarenkolar daha kısa süreli ve daha yüksek tekrar hızlarındaki kıvılcım deşarjlarının etkin bir işleme için gerekli kaliteye sahip olduğunu ve deşarjın bir yalıtkan içine daldırılmasıyla enerjinin çok küçük bir alanda yoğunlaştırılabileceğini görmüşlerdir. Sonuçta şekil 4.9'da görülen RC devresini geliştirmişlerdir. Takım ve iş parçası bir yalıtkan içine daldırılmıştır ve bir DC kaynağından şarj olan bir kapasitörün iki ucuna bağlanmıştır. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi kapasitör voltajındaki bir artış kırılma voltajından büyük olacaktır. Dolayısıyla iş parçası ile takım arasında bir kıvılcım oluşturacak kadar büyüktür. Kıvılcım, genelde en küçük elektrot aralığında görülen en düşük elektrik direncine sahip bölgede oluşur. Her iki elektrottan da metal bu bölgede kaldırılır. Her deşarjdan sonra kapasitör, direnç üzerinden DC

kaynağı ile tekrar şarj edilir ve takip eden kıvılcım bir sonraki en dar aralığa transfer edilir.



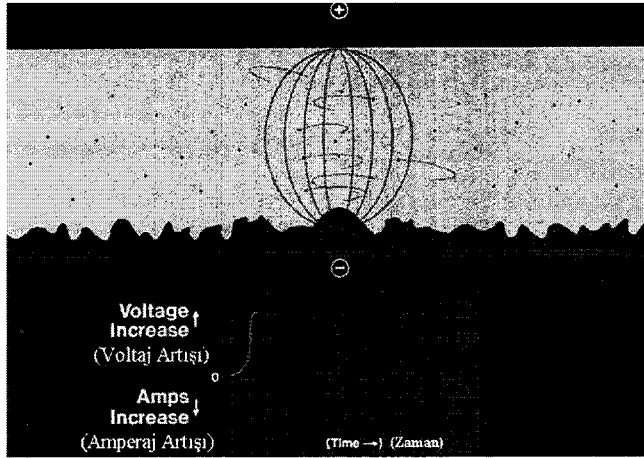
Şekil 4.10. Kapasitör voltajının zamanla değişimi [16]

Elektriki aşındırmayla işlemede malzemenin kaldırılması, iki elektrot arasında oluşan elektrik kıvılcımlarının aşındırma (erozyon) etkisine dayanır. Karmaşık aşındırıcı kıvılcım fenomenini açıklamak için çeşitli teoriler öne sürülmüştür. Bunlar:

1. Elektro-mekanik teorisi.
2. Termo-mekanik teorisi.
3. Termo-elektrik teorisi [20].

Elektro-mekanik teorisi, malzeme parçacıklarının aşınmasının yoğun elektrik alanının bir sonucu olduğunu ileri sürmektedir. Bu teoriye göre elektrik alanı malzemenin kafes yapısındaki bağ kuvvetlerini yenerek, iş parçasından malzeme parçacıklarını ayırmaktadır. Bu teori ısı etkileri göz önünde bulundurmaz. Deneysel kanıtların yokluğu bu teoriyi desteklemektedir. Termo-mekanik teorisi EDM işlemlerinde malzeme kaldırma mekanizmasını, “alev jetleri”nin neden olduğu malzeme ergimesine bağlamaktadır. Bu alev jetleri deşarjın çeşitli elektriki etkilerinin bir sonucudur. Bununla birlikte bu teori deneysel verilerle mutabık değildir ve kıvılcım erozyonu etkisine makul bir açıklama getirmemektedir. Deneysel kanıtlarla en iyi desteklenen teori termo-elektrik teorisidir. Bu teori EDM işlemlerinde malzeme kaldırma mekanizmasının, yüksek yoğunluklu deşarj akımının neden olduğu son derece yüksek sıcaklıkların bir sonucu olduğunu ileri sürmektedir. İyi desteklenmesine rağmen yorumlamadaki güçlükler nedeniyle bu teorinin kesin ve tam olduğu düşünülemez [20].

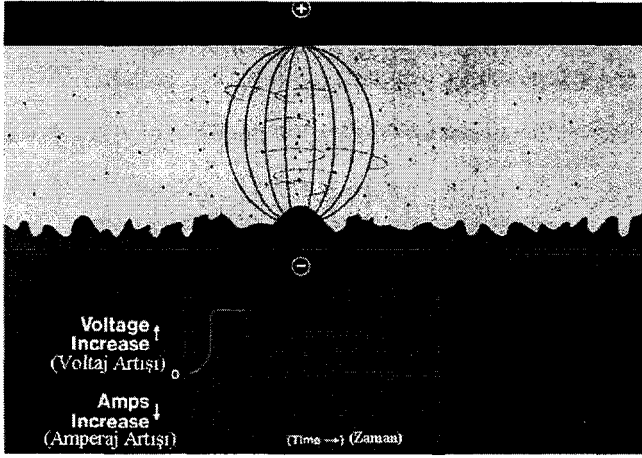
EDM işlemlerinin zaman içinde nasıl geliştiği hakkında çeşitli teoriler bulunmakla beraber, deneysel sonuçlarla en iyi desteklenen teori termo-elektrik modeldir. Aşağıdaki şekillerle (şekil 4.11.a-1) bir EDM çevrimi esnasında ortaya çıktığı kabul edilen olaylar adım adım gösterilmiştir. Şekillerin altındaki grafikler o noktadaki voltaj ve akım değerlerini vermektedir.



Şekil 4.11.a [20]

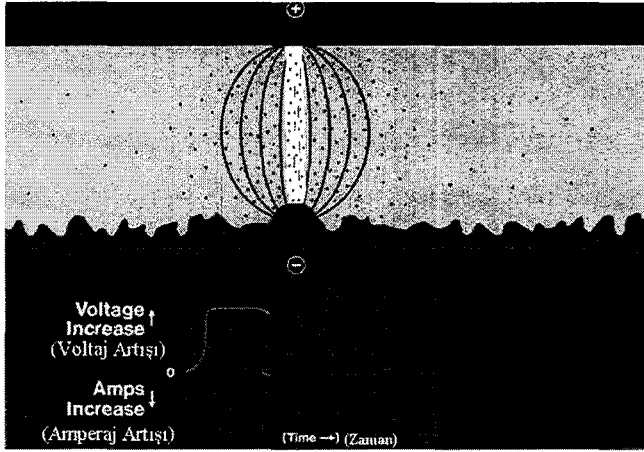
Yüklenmiş bir elektrot iş parçasına yaklaştırılır. Aralarında yalıtkan sıvı olarak bilinen bir sıvı bulunmaktadır. Yalıtkan sıvı iyi bir yalıtkan olmasına rağmen yeterince yüksek bir potansiyel, sıvının iyonik (yükli) parçacıklara ayrılmasına neden olur ve elektrik akımının elektrottan iş parçasına geçmesini sağlar. Sıvı içinde asılı bir şekilde bulunan grafit ve metalik parçacıklar bu elektrik transferine iki şekilde yardımcı olur. Birinci olarak parçacıklar (elektriki iletkenler) yalıtkan sıvının iyonlaşmasına yardımcı olur ve yükü doğrudan taşır. İkinci olarak da bu parçacıklar sıvının elektriki kırılmasını katalize ederler.

Elektrik alanı, elektrot ile iş parçası arasındaki mesafenin en düşük olduğu noktada (şekildeki yüksek nokta) en güçlüdür. Şekildeki grafik potansiyelin (voltaj) artarken akımın sıfır olduğunu göstermektedir (şekil 4.11.a).



Şekil 4.11.b [20]

İyonik parçacıkların sayısı arttıkça yalıtkan sıvının yalıtım özellikleri, elektrik alanının en güçlü kısmında merkezlenmiş dar bir kanal boyunca azalır. Voltaj en yüksek değerine ulaşmıştır, fakat akım hala sıfırdır (şekil 4.11.b).



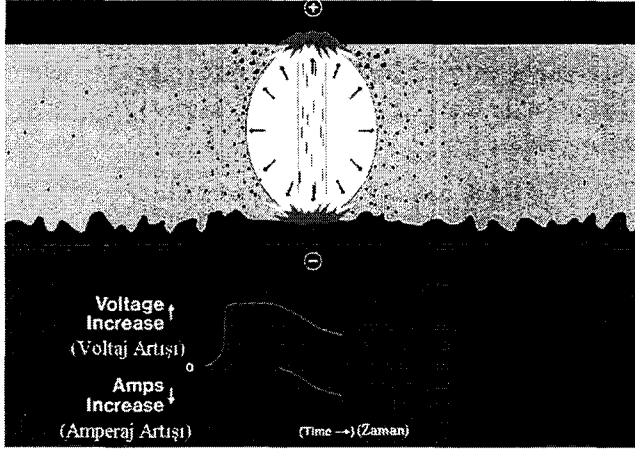
Şekil 4.11.c [20]

Sıvının yalıtkanlık özelliği azaldıkça bir akım oluşur. Voltaj düşmeye başlar (şekil 4.11.c).



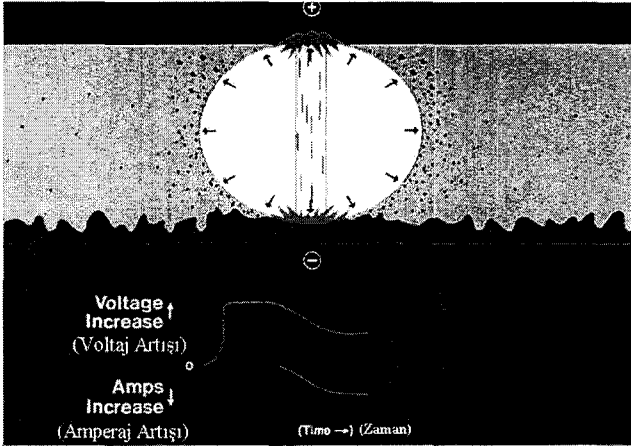
Şekil 4.11.d [20]

Akım arttıkça hızlı bir şekilde ısı ortaya çıkar ve voltaj düşmeye devam eder. Isı bir miktar sıvıyı, iş parçasını ve elektrodu buharlaştırır ve elektrotla iş parçası arasında bir deşarj kanalı oluşmaya başlar (şekil 4.11.d).



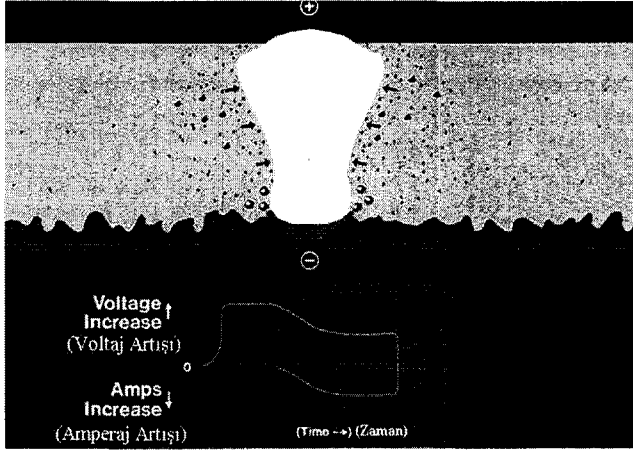
Şekil 4.11.e [20]

Buhar kabarcığı dışarı doğru genişlemeye çalışır, fakat bu genişleme iyonların deşarj kanalına doğru olan hareketiyle sınırlıdır. Bu iyonlar ortaya çıkan son derece yoğun elektromanyetik alan tarafından uyarılırlar. Akım yükselmeye devam ederken voltaj düşer (şekil 4.11.e).



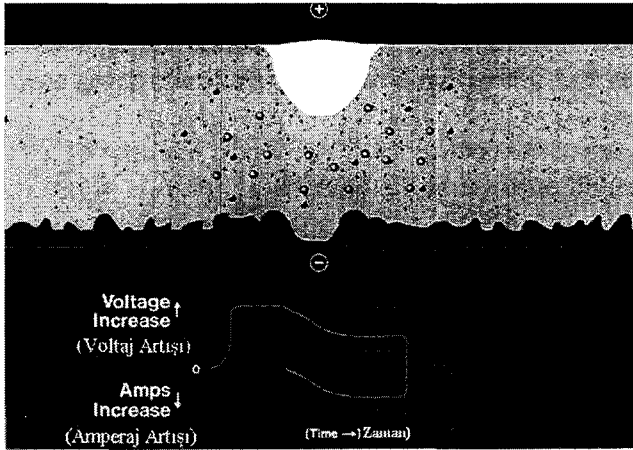
Şekil 4.11.f [20]

Akımın verildiği (on) zamanının sonuna doğru akım ve voltaj dengelenmiştir. Buhar kabarcığı içindeki ısı ve basınç en yüksek değerine ulaşmıştır ve bir miktar metal kaldırılmıştır. Deşarj kolonunun tam altındaki metal tabakası ergimiş haldedir, fakat buhar kabarcığının basıncı sayesinde yerinde tutulmaktadır. Bu anda deşarj kanalı buharlaşmış metal, yalıtkan sıvı ve karbondan oluşmuş süper ısıtılmış bir plazma şeklindedir ve içinden yoğun bir akım geçmektedir (şekil 4.11.f).



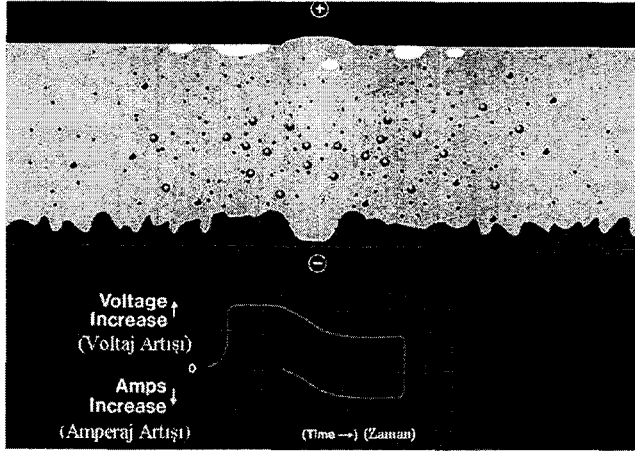
Şekil 4.11.g [20]

Akımın kesildiği (off) zamanının başında voltaj ve akım sıfıra düşmüştür. Sıcaklık hızla düşer ve buhar kabarcığını yıkarak ergimiş metalin iş parçasından kaldırılmasına neden olur (şekil 4.11.g).



Şekil 4.11.h [20]

Taze yalıtkan oluşan çukura hücum eder, metal kalıntılarını temizler ve iş parçasının yüzeyini soğutur. İş parçasından kaldırılamayan ergimiş metal katılarak yeniden döküm (recast) tabakasını oluşturur (şekil 4.11.h).



Şekil 4.11.1 [20]

Şekil 4.11.a-ı. EDM işleminin basamakları [20]

Kaldırılmış metal katılaşarak küçük kürecikler oluşturur ve elektrottan gelen karbon kırıntılarıyla birlikte yalıtkan sıvı içinde yayılır. Kalan buhar yüzeye yükselir. Akım yeterli bir süre boyunca kesilmezse metal kalıntıların toplanarak kıvılcımı kararsız bir hale getirir. Bu durum elektroda ve iş parçasına hasar verebilecek bir DC ark oluşturabilir (Şekil 4.11.1).

Akımın bu verilme ve kesilme (on/off) sırası bir EDM çevrimini temsil eder ve saniyede 250.000 kere tekrarlanabilir [20].

4.2.2. EDM'in avantaj ve dezavantajları

Elektrikli aşındırmayla işleme ile kazanılan başlıca avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Malzeme işleme hızı işlenen metalin ergime noktasına bağlı olduğundan EDM iş parçasının sertliğinden bağımsızdır.
2. Karmaşık şekiller oldukça hassas bir şekilde işlenebilir. EDM'in hassasiyeti $\pm 5 \mu\text{m}$ 'dir.
3. Elektrot ile iş parçası arasında temas olmadığından ince kesitlerin işlenmesi mümkündür. Aynı nedenden dolayı elektrodun iş parçasına zarar verme riski yoktur.
4. EDM'de çapak oluşmaz; yüzey kalitesi iyidir ($0.05-0.1 \mu\text{m}$); işleme sonrası taşlamaya gerek duyulmaz.

5. Geleneksel yöntemlerle işlenmesi güç metallere, alaşımlar ve karbitler sertliklerine bakılmaksızın iletken olmaları şartıyla EDM ile işlenebilir.

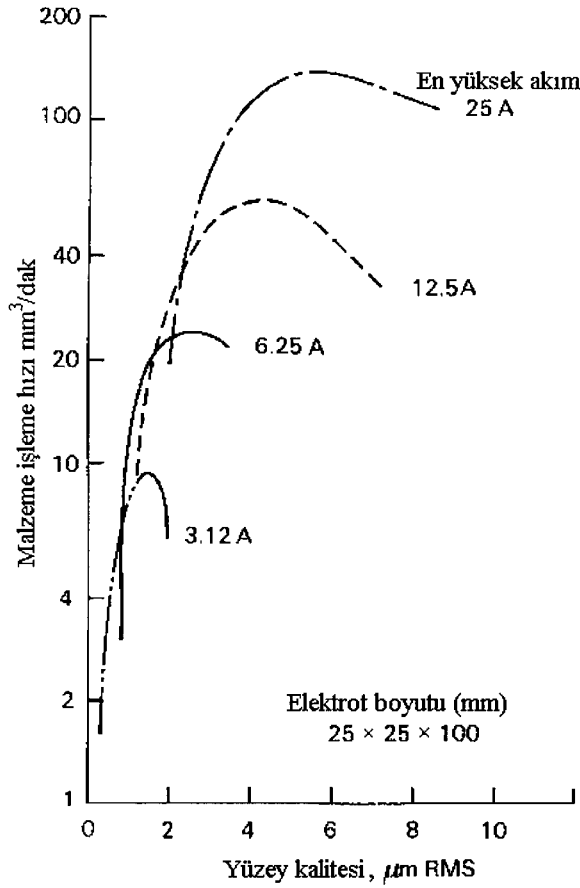
Bu avantajların yanında EDM'in birtakım dezavantajları da vardır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir:

1. İş parçası gibi takım da aşınmaya maruz olduğundan değiştirilmesi gerekir. Bu da maliyetleri artırır.
2. EDM oldukça yavaş bir yöntem olduğundan, mümkün olan durumlarda geleneksel yöntemlerle işleme daha ucuzdur [16,18,20,25].

4.2.3. İşleme hızı

EDM'in işleme hızını tam olarak ifade eden net bir açıklama henüz bulunamamıştır. İşleme hızı iş parçasının ergime noktası ve gizli ısı gibi birçok malzeme özelliklerine, takım elektrotlarının özelliklerine ve iş parçası ile takım elektrotlarının şekil ve boyutu gibi geometrik etkenlere bağlıdır. Ayrıca işleme hızı akım, voltaj, "on/off" süreleri, sadme şekli, polarite ve yalıtkanın özellikleri gibi etkenlerden de etkilenir.

İşleme hızı ile ilgili en kullanışlı veriler ekipman tedarikçileri tarafından verilenlerdir. Tipik malzeme kaldırma hızları $0.1-10 \text{ mm}^3/\text{dk}/\text{A}$ 'dır. Örneğin 25 A'lık bir makine ile dakikada 410 mm^3 malzeme kaldırılırken, 400 A'lık bir makine ile dakikada 4350 mm^3 malzeme kaldırılabilir. Şekil 4.12'de grafit bir elektrotla çelik bir iş parçasının işlenmesinden elde edilen sonuçlar verilmiştir [16,18,25].



Şekil 4.12. EDM'in grafit elektrot ile özellikleri [16]

4.2.4. Uygulama alanları

EDM sertleştirilmiş çelikler, karbitler, yüksek mukavemetli alaşımlar ve hatta çok kristalli elmas ve bazı seramikler gibi son derece sert iletken malzemeleri işleme yeteneğine sahiptir. Bu yöntem özellikle karmaşık şekilli deliklerin delinmesi için uygundur. Küçük parçalar ve geleneksel mekanik kesme kuvvetlerine dayanamayacak kadar ince veya hassas malzemelerden yapılmış parçalar tipik uygulama örnekleridir. Uçak motor endüstrisinde genelde imalatta kullanılmakla beraber delme işlemleri, parça yenileme operasyonları esnasında kullanılmaktadır [16,18,25]

4.2.4.1. Delik delme

EDM ile delik delerken genelde içi boş boru şeklinde elektrotlar kullanılır. İşleme kalıntılarının delikten atılması için tüpün içinden yalıtkan sıvı fişkırtılır. Nadiren katı çubuklar elektrot takımı olarak kullanılır. Bu durumda iş

parçasına bir kılavuz (ön) delik açılmalıdır. Böylece yalıtkan sıvı işleme bölgesine emme ya da püskürtme yoluyla fişkırtılabilir. Geleneksel delik delme işlemlerinden farklı olarak takımın dönüş hareketine gerek duyulmaz. Böylece konik, kanallı ve hatta bükülmüş delikler açmak mümkündür. EDM ile delmede püskürtme sıklıkla giriş bölümünde genişleyen konik bir delik bırakır. Bu etkinin nedeni elektrotun yan çeperlerinden fişkıran işleme kalıntılarının çeperlere temas ederek, iki elektrot arasında kıvılcım oluşturmastır. Bu nedenle aşırı kazıma (overcut) artar [16].

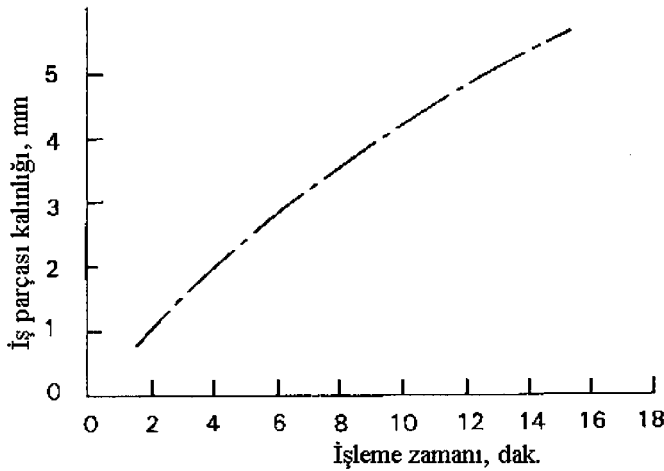
EDM ile 0.05 mm kadar küçük çapta yuvarlak ya da karmaşık şekilli delikler yaklaşık 20:1'lik bir uzunluk:çap oranında delinebilir. Ayrıca 0.05-0.30 mm'ye kadar olan dar kanallar rahatlıkla açılabilir. Delme hızları 25 mm/dk'ya kadar yükselebilir [18,25].

0.1-0.5 mm arasında çapa sahip deliklerin EDM ile açılmasında 0.1 mm/dk'lık besleme hızları tipiktir ve 0.01-0.05 mm'lik bir aşırı kazıma normal sayılır. Delik delme işleminde ana kıvılcım takımın hücum kenarında oluşur. Fakat işleme kalıntıları iç çeperlerden temizlenirken kıvılcım oluşmasına neden olurlar. Bu da aşırı kazıma ve konik deliklere neden olur. Bu etki ECM'deki kadar büyük değildir. Bu yüzden EDM genelde yüksek uzunluk/çap oranlarına sahip hassas delikler için tercih edilir [16].

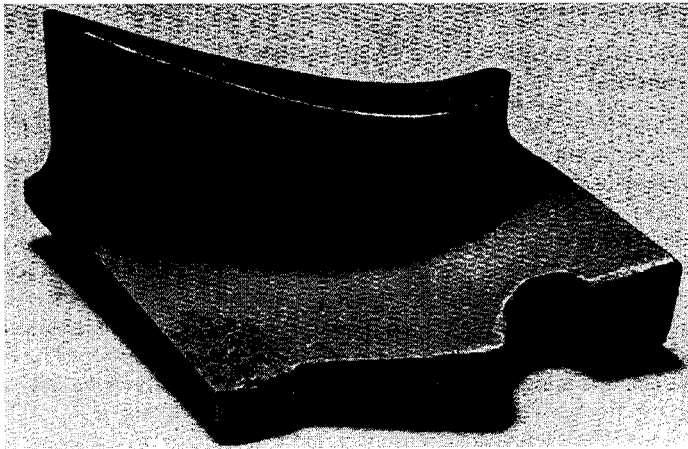
Bu teknik geniş ölçüde uçak motor endüstrisinde örneğin nikel bazlı alaşımlar gibi sert metallerden yapılmış türbin palelerindeki soğutma kanallarının açılmasında kullanılmaktadır. Bu endüstride EDM ile delme yönteminin kullanıldığı bir diğer uygulama da jet motorunun halka tipi yanma odalarında tek bir operasyonla 36 delik açılmasıdır. Hastelloy ve HS 188 alaşımlarından yapılmış yanma odaları konik çift çeperli içi boş silindirlerdir ve sonuçta birbirlerine kaynak ile tutturulurlar. Her iş parçası 1-6.25 mm kalınlığında yüksek kobalt alaşımına açılmış ve çapları 0.75-2.5 mm arasında değişen 7000 deliğe sahiptir. Kullanılan elektrotlar 400 mm uzunluğundadır ve yüksek yoğunluklu bakır-grafitten yapılmıştır. Bir operasyonda 36 delik birden açmak için kullanılan güç kaynağı her biri 2 A'lık 36 kanala sahiptir ve böylece toplam akım oranı 720 A'dır. Bir CNC sistemi deliklerin ± 0.25 mm'lik bir toleransla yerleştirilmesini sağlar. %15-20'lik bir aşınma oranı elde edilmiştir ve elektrotlar 2.5 mm

derinliğinde bir delik açmak için 3 mm'lik bir derinliğe beslenmek zorunda kalınmıştır. Bu etki elektrotun ucunda dairevi bir aşınmaya neden olarak “mermi şeklinde bir burun” oluşturmuştur. Bu sorunla başa çıkmak için otomatik bir elektrot ince ayar cihazı kullanılmıştır [16].

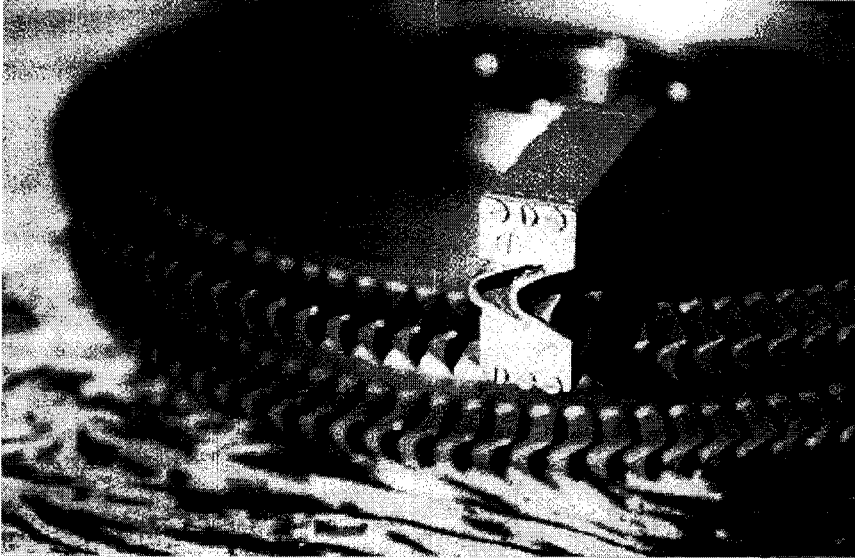
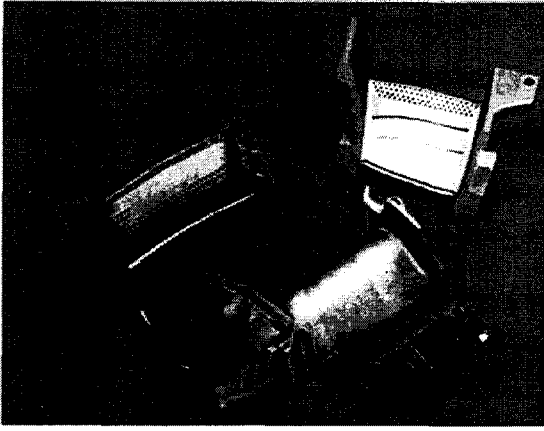
Çok sayıda delik delme işlemi statik kanatçıklarda ve dönen palelerde de kullanılmaktadır. Bu uygulamalar otomatik elektrot besleme sistemlerinin, çok yönlü elektrot kılavuzlarının ve iş parçası nakil mekanizmalarının gelişmesine öncülük etmiştir. Sonuç olarak mevcut makineler 0.3 mm'ye kadar küçük çapların 50'den fazla elektrotla aynı anda delinmesini mümkün kılmıştır. Şekil 4.13'de nikel alaşımında 0.5 mm çaplı elektrotla 20 delik delmek için gerekli tipik süreler gösterilmiştir. Ayrıca jet motor komponentlerinde, 1.6 mm kalınlığındaki Stellite süper alaşımından yapılmış ve 45° açığa sahip 1.27 mm çaplı 60 delik, EDM ile delinmektedir [16]. Şekil 4.14 ve 4.15'de EDM ile işlenmiş paleler görülmektedir.



Şekil 4.13. İşleme hızının komponentin kalınlığı ile bağlantısı [16]



Şekil 4.14. Bir türbin palesi üzerinde EDM ile delinmiş soğutma delikleri [16]



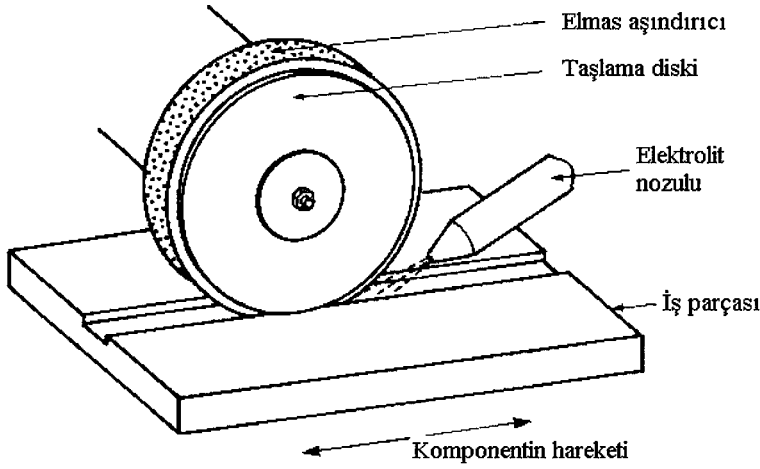
Şekil 4.15. EDM ile işlenmiş çeşitli paleler [20]

4.3. Elektrokimyasal Taşlama (ECG)

Elektrokimyasal taşlama ve elektriki aşındırmayla işleme endüstride genelde birbirine karıştırılmaktadır. EDM yöntemi, yalıtkan bir ortamdaki bir elektrottan yayılan kıvılcım deşarjlarının neden olduğu kontrollü bir metal erozyonu ya da buharlaşması işlemidir. Bunun sonucunda metal erir ya da patlar. Daha sonra metal soğutularak yeniden döküm (recast) tabakası oluşturulur.

Elektrokimyasal taşlama bir elektrolit sıvının içindeki elektrik akımı pasajından doğan kimyasal etki ile metali kaldıran bir işlemdir. Bir aşındırma (deşarj) işlemi değildir. Bu işlem bazen tam tersine elektro kaplama ile karşılaştırılır. Bakır kaplamada olduğu gibi iş parçası üzerinde metal biriktirme yerine metal çözünür ve iş parçasından kaldırılır. Metal deformasyona uğratılmaz, çözündürülür. Bununla birlikte elektrokimyasal taşlama aşındırıcı bir yardıma

gerek duyar. Şekil 4.16'da Elektrokimyasal taşlama işleminde kullanılan temel aparatlar görülmektedir.



Şekil 4.16. Elektrokimyasal taşlama [16]

4.3.1. Temel prensipler

Tüm elektrokimyasal işlemler bir DC güç kaynağına bağlanmış ve elektrolit adıyla bilinen elektriki iletkenliğe sahip bir solüsyona daldırılmış iki elektroda gerek duyar. Elektrokimyasal taşlamada iş parçası pozitif elektrot (anot) ve elektriki iletken aşındırıcı disk de negatif elektrottur. Elektrolit genelde tuzdur ya da kimyasal tuzların ve su içinde çözünen diğer katı maddelerin kimyasal bir karışımıdır. Bir lüle içinden iş parçasına ve diske kuvvetli bir akışla pompalanır [19].

Elektrik akımı elektrolitten geçerek iş parçası ile disk arasından akarken, iş parçasında yüzeydeki metalin bir metal okside dönüşmesine neden olan kimyasal bir reaksiyon oluşur. Bu yumuşak yüzeysel metal oksit diskteki aşındırıcılar tarafından süpürülür. Oksit film süpürülürken daha fazla metal yüzeyini kimyasal olarak oksitlenmeye maruz bırakır. İşlem oksit süpürüldüğü müddetçe devam eder. Süpürme işlemi durduğu anda kimyasal reaksiyon durur. Sonuç olarak iş parçasının sadece disk ile temas eden yüzeylerinde metal kaldırılır [19].

Kimyasal değişim hızı disk ile iş parçası arasında akan elektrik akımına bağlıdır. Akım şiddeti yükseldikçe kimyasal değişim hızı ve buna bağlı olarak metal kaldırma hızı artar. Voltajın artırılmasıyla akım şiddeti bir noktaya kadar artırılabilir. Akım şiddeti ve metal kaldırma hızı gerçekten lineer olarak

voltajdaki artışla beraber artar. Bu artış şiddetli arklar ve kıvılcımlar oluşana kadar sürer. Bu olay voltajın, malzemenin iletim kapasitesini aşması durumunda görülür. Bir anda işlem ECG'den EDM'e dönüşür ve hem iş parçası hem de diskte şiddetli karıncalanmalar (küçük oyuklar) oluşur. Kullanılan katot diskin tipine ve iş parçasının malzemesine bağlı olarak bu değişim 10-15 V arasında herhangi bir değerde oluşabilir. Voltajın tekrar ayarlanması bu durumu çabucak düzeltir [19].

Elektrokimyasal taşlama işleminde, elektrotlar arasındaki 0.013-0.08 mm'lik küçük boşluk yüzünden akım şiddeti oldukça yüksektir. İki elektrot, disk ve iş parçası esasen birbiriyle temas halindedir. Sonuç 500 A/cm²'ye kadar yükselebilen akım yoğunluklarıdır (elektrotlar arasındaki cm² cinsinden temas yüzeyine düşen amper). Bu, 500 A'lık akımın doğal olması anlamına gelmez. Temas alanları genelde 1 cm²'den çok daha küçüktür ve birçok metal, yüksek akım yoğunluklarına izin vermeyecek kadar az iletkenidir. Disk ile iş parçası arasına 4-8 V'luk bir voltaj uygulandığında 120-240 A/cm²'lik akım yoğunlukları oluşur. ECG'nin normalde düşük voltajlı (0-15 V) ve yüksek akımlı bir elektriki işlem olduğunun anlaşılması önemlidir. ECG'de metal temelde elektrokimyasal işleme ile kaldırılırken yalıtkan parçacıkların mekanik hareketi toplam kaldırılan metal miktarının %5-10'u kadar ilave bir metali kaldırır [16,19].

4.3.2. ECG'nin uygulamada kullanımı

Everite firması tarafından tasarlanan DC güç kaynakları 0-15 V arasında voltaj kontrolü sağlar. Standart akım şiddeti değerleri 300, 600 ve 900 A'dır. Daha yüksek voltaj ve akım şiddetleri de mevcuttur. İstenen voltaj ayarlandıktan sonra, güç kaynakları sabit akım yoğunluğu modunda akım verir. Disk ile iş parçası arasındaki temas yüzeyi değiştikçe akım şiddeti otomatik olarak ayarlanır. Böylece sabit akım yoğunluğu sağlanmış olur ve sabit bir metal kaldırma oranı elde edilir [19].

Örneğin 1.25 mm derinliğinde bir kanal açmak istendiğinde disk, bir geçişte 1.25 mm derinliğinde metal kaldıracak şekilde ayarlanır. Diskin iş parçasına temas ettiği anda elektrik akımı geçmeye başlar ve bu ampermetrede görülebilir. Maksimum temas yüzeyi elde edilene kadar akım şiddetiyle beraber

temas yüzeyi de artar. Disk iş parçasından uzaklaşmaya başlayınca kadar akım şiddeti sabit kalır daha sonra yavaş yavaş sıfıra iner [19].

Elektrokimyasal taşlamada kullanılan diskler elektriksel iletkenliğe sahip aşındırıcı diskler olmalıdır. Bir çok metal için reçine ile yapıştırılmış alüminyum oksit diskler tavsiye edilir. Elektriksel iletkenliğin sağlanması için reçine bakır içermektedir. Elektriksel direnç ihmal edilebilir olmalıdır. Aşındırıcının görevi ECG işleminin verimini arttırmak ve işlemin devamlılığını sağlamaktır. Oksit filmini süpürür, yalıtkan görevi görür ve elektrolit ile doldurulan bir çukur açar. Aşındırıcılar genelde alüminyum oksit, elmas ya da borazon gibi iletken bir malzemeden yapılırlar. Elektrotlar arasında 0.012-0.050 mm arasında yalıtkan bir boşluk oluştururlar. Eğer bu yalıtkan boşluk olmazsa kısa devre oluşur. Tungsten karbit gibi çok sert malzemeler için tavsiye edilen aşındırıcılar elmas ve borazondur [19].

Alüminyum oksit, elmas ya da borazon aşındırıcıların görevi kimyasal reaksiyon (oksit) ürünlerini iş parçası yüzeyinden süpürmek, elektrotların birbirine temas etmesini önlemek ve elektroliti temas yüzeyine iletmektir. Bu işlevleri yerine getirirken disk iş parçası ile temas etmelidir. Bu da bir miktar malzemenin aşındırıcı tarafından kaldırılmasına neden olur. İdealde, kaldırılan malzemenin sadece %5-10'u aşındırıcı tarafından sağlanır, gerisi elektrokimyasal etkinin sonucudur. Aşındırma etkisinin düşük olmasından dolayı disk ömrü geleneksel disklerin ömründen 8-10 kat daha uzundur [19].

ECG'de bir miktar aşırı kazıma (overcut) görülür ve bu da toleransları etkiler. Aşırı kazıma oksit tabakasındaki iyonların difüzyonu yüzünden katot diskin şekline ve derinliğine uymayan metal erozyonudur. Aşırı kazıma miktarı işlenen metale, elektrolitin bileşenlerine, akım yoğunluğuna ve bu akımın uygulama süresine bağlıdır. Bakır ve krom gibi metaller çok miktarda aşırı kazıma gösterirler, çünkü anot reaksiyonundaki ürünler suda çözünebilirler. Yani elektrokimyasal reaksiyonu kontrol edecek bir yalıtkan film oluşamaz. Diğer yandan titanyum anot ürünleri suda çözünemezler, yoğun ve pasifleştirme etkisine sahiptirler. Bu yüzden çok az bir aşırı kazıma görülür. Voltaj yükseldiğinde ve besleme hızı azaldığında aşırı kazıma miktarı artar. Sabit akım yoğunluklu güç kaynakları ve iyi ayarlanmış beleme sistemleri ile aşırı kazıma sabit bir değerde

tutulabilmektedir. Böylece toleranslar diskin ayarlanmasıyla kontrol edilebilir. Ayrıca voltajın düşürülmesi, besleme hızının ve elektrolitin değiştirilmesiyle de aşırı kazıma azaltılabilir. Bunun yanında diskin kenarları % 50'lik nitrik asit solüsyonuyla işlenerek iletken özellikleri en aza indirilir ve aşırı kazıma azaltılabilir [19].

Uygun ayarlarla ± 0.030 mm'lik toleranslara ulaşılmıştır. ECG parametrelerinin son derece hassas kontrolüyle ± 0.003 mm ya da 3 mikron'luk toleranslara ulaşmak mümkündür [19].

4.3.3. ECG'nin avantaj ve dezavantajları

Elektrokimyasal taşlama ile kazanılan başlıca avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

1. İşlenmesi güç sert malzemelerde yüksek bir metal kaldırma oranı sağlar.
2. Taşlama diskinde aşınma az olduğundan disk ömrü geleneksel taşlama yöntemlerinden 8-10 kat daha uzundur.
3. Taşlama diskinin sık sık değiştirilmesi gerekmediğinden hızlı ve ekonomiktir.
4. ECG'de malzeme çözündüğünden iş parçalarında çapak ve gerilmeler görülmez.
5. İş parçasına uygulanan ısı ve basınç minimum olduğundan malzemede metalürjik hasarlar bırakmaz.
6. İnce çeperli ve ısıya hassas malzemelere uygundur.
7. Sert alaşımlar işlenirken metal kaldırma oranı geleneksel metotların 5-10 katı büyüktür ve işlem 20 kat daha hızlıdır.
8. Yüzey kalitesi genelde 5-40 μm RMS'dir.

Bu avantajların yanında ECG'in birtakım dezavantajları da vardır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir: Köşelerin içleri taşlanırken elektrik alan etkilerinden dolayı hassasiyet kaybolmaktadır. 0.25-0.375 mm'den daha iyi yarıçaplar nadiren elde edilir [16,19].

4.3.4. İşleme hızı

ECG’de işleme hızı ya da başka bir deyişle metal kaldırma hızı iş parçasının iletkenliğine, malzemenin çözünme hızına, makinenin akım şiddeti oranına, disk ile temas alanına, elektrolitin akışı, kompozisyonu, konsantrasyon ve sıcaklığına ve elektrotlar arasındaki aralığa bağlıdır [16,19].

Elektrokimyasal taşlama Faraday Kanunu’nun bir uygulamasıdır. Faraday Kanunu bir Faraday’ın (96494 C ya da amper-saniye) bir gram eşdeğer ağırlıktaki malzemeyi serbest bırakacağını ifade eder. Bu yüzden demirin gram eşdeğer ağırlığı, atomik ağırlığının çözülmüş iyon değerine bölünmesiyle bulunur ($56/2=28$). Yani laboratuvar şartlarında 28 gr demir her Faraday’lık elektrik akımı geçişi boyunca çözünecektir. Çizelge 4.3’de 1000 A’lık akım geçişindeki teorik metal kaldırma oranları listelenmiştir [19].

Çizelge 4.3. Elektrokimyasal taşlamadaki teorik işleme hızları

Metal	Birleşme değeri	Yoğunluk, gr/cm ³	İşleme hızı, 1000 A akım, %100 verim	
			Kütle kg/sa	Hacim, cm ³ /dk
Alüminyum	3	2.67	0.33	2.06
Berilyum	2	1.85	0.17	1.50
Krom	2	7.19	0.97	2.25
	3		0.65	1.51
	6		0.32	0.75
Kobalt	2	8.85	1.09	2.05
	3		0.73	1.38
Neobiyum	3	8.57	1.15	2.26
	4		0.87	1.69
	5		0.71	1.34
Bakır	1	8.96	2.36	4.39
	2		1.18	2.20
Demir	2	7.86	1.04	2.21
	3		0.70	1.47
Magnezyum	2	1.74	0.45	4.34
Manganez	2	7.43	1.02	2.28
	4		0.51	1.15
	7		0.29	0.66
Molibden	3	10.22	1.19	1.95
	4		0.75	1.47
	6		0.59	0.98
Nikel	2	8.90	1.09	2.11
	3		0.73	1.36
Silikon	4	2.33	0.26	1.87
Gümüş	1	10.49	4.02	6.39
Kalay	2	7.30	2.21	5.05
	4		1.10	2.52
Titanyum	3	4.51	0.59	2.16
	4		0.45	1.65

Çizelge 4.3. Elektrokimyasal taşlamadaki teorik işleme hızları (devam)

Metal	Birleşme değeri	Yoğunluk, gr/cm ³	İşleme hızı, 1000 A akım, %100 verim	
			Kütle kg/sa	Hacim, cm ³ /dk
Tungsten	6	19.3	1.14	0.98
	8		0.85	0.74
Uranyum	4	19.1	2.22	1.92
	6		1.18	1.29
Vanadyum	3	6.1	0.63	1.74
	5		0.38	1.05
Çinko	2	7.13	1.22	2.85

Metal kaldırma oranları formülle belirlenmektedir, fakat bunlar uygulamada istenildiği kadar kesin değillerdir. Daha önce belirtilen birçok değişken, elektrotlar arasındaki mesafe, metalürjideki birçok değişken ve işleme şartları altındaki kimyasal işlemdeki değişiklikler kesin metal kaldırma oranlarının ancak iş parçası üzerinde yapılacak deneysel testlerle belirlenebileceğini doğrulamıştır. Gözönünde bulundurulması gereken bir diğer nokta da ohm kanunudur ($E = I \times R$, E = voltaj, I = akım, R = direnç). Formülden görüleceği üzere voltaj sabitken direncin azaltılmasıyla akım arttırılabilmektedir. Bu yüzden güç kaynağındaki, kablolardaki, katot diskteki ve elektrottaki sistem tarafından kontrol edilen direnin maksimum performansı tasarım tarafından nominaldir. İş parçasındaki direnç alaşıma bağlıdır ve kontrol edilebilir. Bakırdaki direnç ihmal edilebilirken, tungsten karbitteki direnç önemli bir faktördür [19].

Anot (iş parçası), üzerinden akım geçtiğinde çözünebilen iletken bir malzeme olmalıdır. Bu özellik iletken olmalarına rağmen çözünmeyen seramik ve kristallerin ECG ile işlenmelerini olanaksız kılar [19].

Elektrokimyasal taşlama ile elde edilen yüzey kalitesi taşlanan metale bağlı olarak 0.2-0.3 μm 'dir, hassasiyet ise genelde 0.125 mm civarındadır [16].

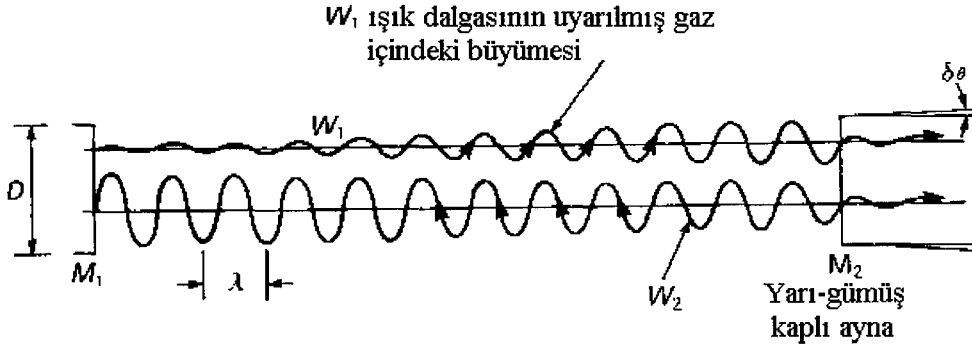
4.3.5. Uygulama alanları

Geleneksel taşlama işlemleriyle işlenemeyecek kadar sert alaşımlardan yapılmış motor komponentlerinde, özellikle dairevi bir şekle sahip olanlarda ECG yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak dönen bal peteği contaların (rotating honeycomb seal) çürütülmesi, nozul kanatçıklarının çürütülmesi ve borazon gibi sert kaplamaların uygulandığı contalardan (air seal) bu kaplamaların kaldırılması verilebilir.

4.4. Lazer Işınıyla İşleme (LBM)

Lazerle işleme son yıllarda keşfedilen prensiplere dayanmaktadır. Bu yöntem buharlaşma yoluyla malzemenin kaldırılacağı iş parçası ile yoğun, yüksek derecede doğrultulmuş, eş evreli (koherent) ve tek renkli (monokromatik) ışık demetinin etkileşimine bağlıdır.

Lazer fenomeni ilk defa 1958'de Schawlow ve Townes tarafından bulunmuştur. Bir rezonans kavitesi şeklinde hareket eden bir Fabry-Perot interferometresi (girişim ölçer) kullanmışlardır. Şekil 4.17'de görüldüğü gibi bu cihaz temelde birbirine paralel, düz ve yarı gümüş kaplı aynalardan oluşmaktadır. İki ayna arasında monokromatik bir ışın demeti bir çok yansımaya uğramaktadır. Aynalar arasındaki kavite (boşluk) gaz moleküllerinin yüksek enerji seviyelerine uyarıldığı yükseltici bir ortamla doldurulmalıdır. [16]



Şekil 4.17. Lazer Fabry-Perot interferometresi [16]

Işık, interferometrenin eksenine paralel bir doğrultuda yayılır ve uyarılmış gazın içine aynalar tarafından geri yansıtılır. Bu yansımalar esnasında ışık aynı fazda tutulur ve bu şekilde ışık yükseltilebilir. Şekil 4.17'de görüldüğü gibi ortamda genişleyen ışık dalgası, M_1 aynasından sağa doğru hareket eden W_1 dalgası ile gösterilmiştir. M_2 aynasından yansıdıktan sonra ters yönde hareket eden W_2 dalgasını oluşturur. M_2 aynası ayrıca ışığı kısmen geçirmektedir. Böylece ışık demedi bu aynadan yayılır ve eksenden $\delta\theta$ açısıyla sapar.

$$\delta\theta = \lambda/D \text{ dir.} \quad (4-3)$$

Burada D aynanın çapıdır. Örneğin $D=10$ mm ve $\lambda=1$ μm iken $\delta\theta = 10^{-4}$ radyan ya da 22 saniyelik bir yaydır. Yani ortaya çıkan ışık oldukça ayarlıdır. Uygun lenslerin kullanılmasıyla ışığın sapması kontrol edilebilir, yani çapı daha geniş bir alana odaklanabilir. Örneğin bir yakut lazer bir flaş lambasıyla uyarılarak 1 ms'de 1 kJ'lık elektrik enerjisi yayabilir. 10^{-3} radyanlık bir sapmaya, 5 mm'lik bir kesite

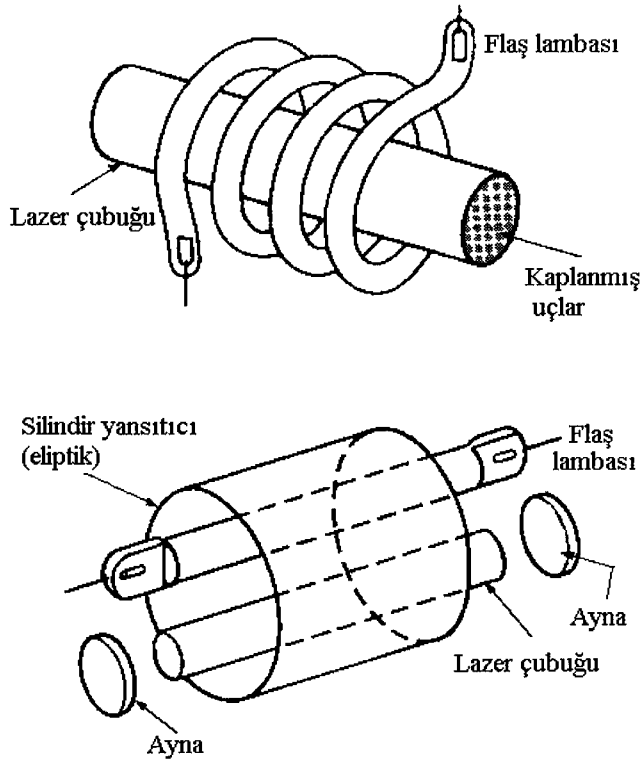
sahip ve 6934 Å dalga boyunda 3 J'lik enerjiye sahip bir lazer ışını üretilebilir. Işığın odaklanmasıyla 1 MW/cm²'lik güç yoğunlukları elde edilebilir [16].

Daha önce belirtildiği gibi lazerler, gaz lazerler (CO₂, CO-argon ve helyum-neon) ve katı hal lazerleri (yakut, cam ve YAG) olmak üzere iki grupta incelenebilir. Parça yenileme işlemlerinde çoğunlukla katı hal lazerleri kullanıldığından bu grup incelenmiştir.

4.4.1. Katı hal lazerleri

Lazer ortamının aktif atomları katı, tipik olarak kristal veya cam bir çubuğa gömülmüştür. Çubuğun uçları birbirine paraleldir ve optik olarak taşlanmış ve parlatılmıştır. Çubuğun uçları optik kavitenin sağlanması için kaplanmış olabilir. Buna alternatif olarak harici aynalar kullanılabilir.

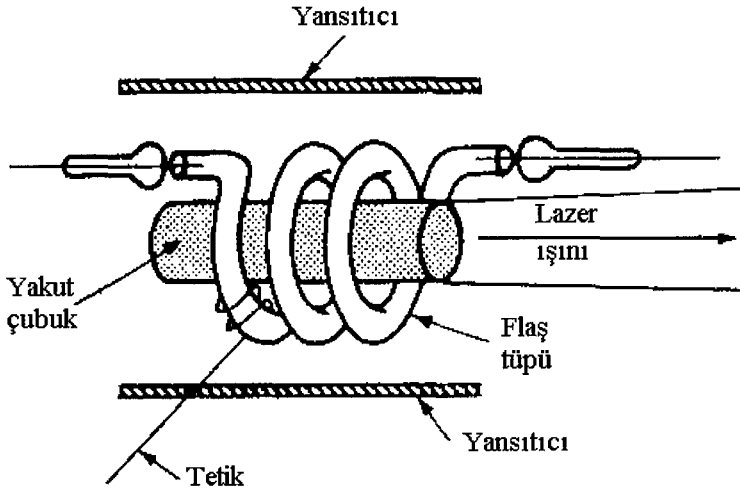
Ksenon flaş lambalar ve yüksek basınçlı cıvalı deşarj lambaları, aktif atomların optik olarak uyarılmasında kullanılan harici ışık kaynaklarıdır. Şekil 4.18'de yaygın bir katı hal lazer konfigürasyonu görülmektedir. Şekil 4.18.a'da uçları kaplanmış lazer çubuğu sarmal bir flaş lambanın içine yerleştirilmiştir. Şekil 4.18.b'de ise flaş lambası düz bir formdadır. [16]



Şekil 4.18. a) Sarmal flaş lambalı katı hal lazeri [16]

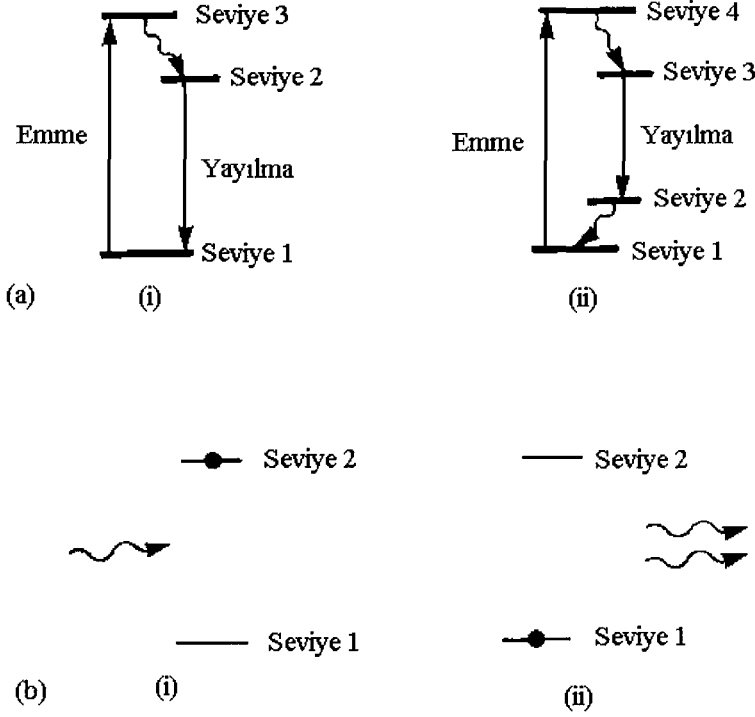
b) Düz flaş lambalı katı hal lazeri [16]

Yakut lazer tipik bir kristalli katı lazerdir. Ana bileşeni ağırlıkça yaklaşık %0.05 krom oksit (Cr_2O_3) ile karıştırılmış sentetik kristalimsi safirden (Al_2O_3) yapılmış bir çubuktur. Kristal kafesindeki alüminyum, malzemeye pembe bir renk katan krom (Cr^{+++}) iyonlarıyla yer değiştirir. Tipik olarak 50 mm uzunluğunda ve 6 mm çapında olan yakut kristalin çevresi, içinde ksenon gazı bulunan sarmal bir kuvars tüp ile sarılmıştır. Bu tüp parlatılmış bir silindir yansıtıcı içine yerleştirilmiştir (şekil 4.19). Yakut kristalleri yaklaşık 300 mm boyunda ve 25 mm çapında üretilebilirler. Bu şekilde üretilen malzeme sert ve dayanıklıdır. İyi bir optik kaliteye ve yüksek bir ısı iletkenliğe sahiptir. Böylece çubuğun soğutulması kolayca sağlanmış olur [7,16].



Şekil 4.19. Yakut lazer [7]

Şekil 4.20.a'da görüldüğü gibi lazer etkisi, uyarılan ışığın krom iyonları tarafından emilerek taban seviyesinden daha üst lazer seviyesinin üstündeki bir enerji bandına (şekil 4.20.a'daki 3. seviye) yükseltilmesiyle sağlanır. İkinci üst lazer seviyesine doğru hızlı ve radyasyonsuz bir sönüşüm gerçekleşir. Lazer, taban seviyesine geçerken oluşur (şekil 4.20.b) ve fazlalık iyonlar bir üst lazer seviyesinde kalır. Bunun gerçekleşmesi için taban seviyesindeki iyonların % 50'sinden fazlasının uyarılması gerekir. Ancak bu şekilde taban seviyesinde popülasyon yer değiştirmesi gerçekleşebilir. Bu üç seviyeli lazer etkisi normalde sadme hareketiyle sağlanan yüksek uyarılmayı gerektirir. Yakut lazerlerin tipik çıkış dalga boyları $0.6943 \mu\text{m}$ ve güçleri de 400 J civarındadır [7,16].



Şekil 4.20. a) Üç seviyeli (i) ve dört seviyeli (ii) lazer için emme ve yayılma [16]
b) Uyarılmadan önceki (i) ve uyarılmadan sonraki (ii) yayılmalar [16]

Bazı katı hal lazerleri dört seviye prensibine göre çalışırlar. Burada taban seviyesindeki iyonlar uyarma ışığıyla 4. seviyeye uyarılırlar (şekil 4.20) ve daha sonra 3. üst lazer seviyesine sönüşürler. Eğer 3. seviye ile 2. seviye arasında bir popülasyon yer değiştirmesi varsa lazer etkisi 2. seviyede oluşur ve iyon taban seviyesine sönüştürülür. Üçüncü ve 2. seviyeler arasında popülasyon yer değiştirmesinin sağlanması için taban seviyesindeki iyonların sadece küçük bir bölümünün uyarılması yeterlidir. Oysa üç seviyeli sistemde iyonların % 50'sinden fazlasının uyarılması gerekir. Buna bağlı olarak dört seviyeli lazer sistemleri daha düşük lazer uyarma ihtiyacına ve lazer eşiklerine (başlangıçlarına) sahiptir. Dört seviyeli gurubun yaygın bir üyesi YAG lazerinin (Nd^{3+} ile karıştırılmış kristalimsi $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) anahtar ögesi olan Nd^{3+} iyonudur. Burada küçük miktarlarda neodinyum, 1.064 μm dalga boyunda kızılötesine yakın lazer çıkışı veren itriyum alüminyum grena (Nd-YAG) kristali çubuklarına katılır. Nd-YAG lazerleri yakut lazerlerden daha büyük olarak yapılabilirler ve 800 W güçte yaklaşık 800 Hz'e sadmelenebilirler (pulse-up) [7,16].

Üçüncü bir katı hal lazerinde cam çubuk kullanılır. Baryum sıklıkla kullanılan bir silikat cam tipidir ve neodinyum cam lazerler için en önemli uyarıcı

iyondur. Belli bir dalga bandının üzerindeki ışığı emmek ve onu neodinyum üzerine transfer etmek için sıklıkla krom kullanılır. Çok yüksek güçlü katı hal lazerlerine ihtiyaç duyulduğunda yaklaşık 1.062 μm dalga boyunda yayılan neodinyum katkılı cam lazerler 1 terawatt (10^{12} W)'a yaklaşan güçle çok kısa sadmeler verecektir [7,16].

Çizelge 4.4'de katı hal lazerlerinin temel fiziksel özellikleri ve performansları görülmektedir.

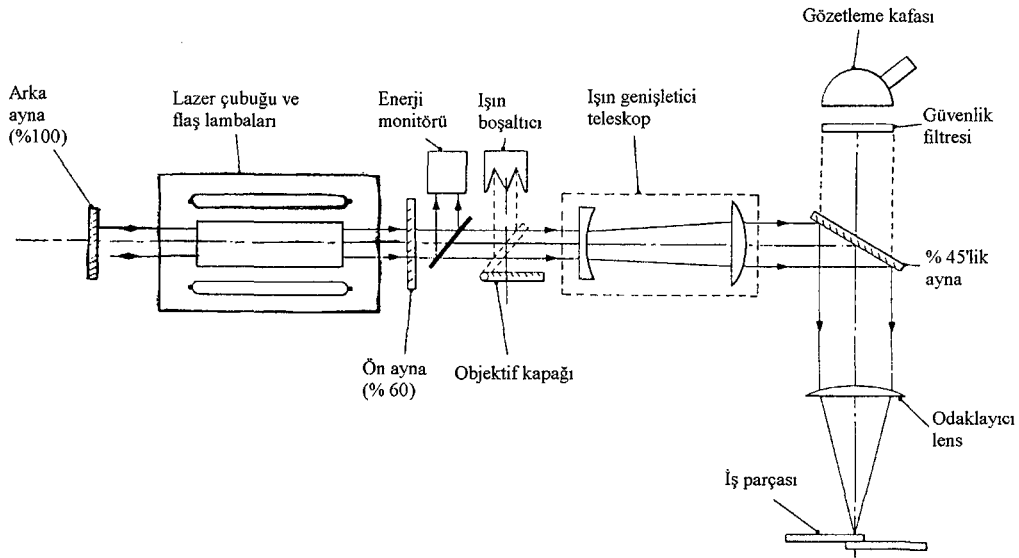
Çizelge 4.4. Katı hal lazerlerinin özellikleri [16]

Malzeme (aktif iyon)	Çıkış dalga boyu, μm	Çalışma modu	Çıkış
Yakut (Cr^{3+})	0.6943	Sadmeli	500 J
YAG (Nd^{3+})	1.06	Sürekli	1100 W
		Sadmeli	10 J
		Q-anahtarlı	2×10^7 W
Cam (Nd^{3+})	1.06	Sadmeli	5000 J

4.4.1.1. Nd-YAG lazeri

Neodinyum katkılı İttriyum Alüminyum Grena (Nd-YAG) kristali oldukça yüksek verimi ve kristal termal özellikleri sayesinde en yaygın katı hal lazer malzemelerinden birisidir. Bu malzemeden cm^3 başına yaklaşık 40 W güç elde edilir. Enerjisini uyarılmış Neodinyum atomundan alır. Neodinyum atomu 1.062 μm dalga boyunda ışık yayarak rahatlar. Bu özel dalga boyu kızılötesinin yanında, görülebilirliğin üstündedir. Cam ve eritilmiş silisten yapılmış standart optik komponentler tarafından iyi bir şekilde nakledilir ve enerjisini birçok metale ve sentetik malzemeye ileterek bu malzemelerin ileri bir teknolojiyle işlenmesini sağlar. Şekil 4.21'de Nd-YAG lazerinin optik şeması verilmiştir [15].

Bu lazerin malzeme işlemede öneme sahip çeşitli versiyonları mevcuttur. Bu tip normal ağır yük lazerleri ortalama 500 W güç üretir. En yüksek güç girdileri 50 kW'a kadar çıkar ve enerji çıktıları sadme başına 100 J ya da daha fazladır. Bu değerler bu tip lazerler için son derece yüksek değerlerdir. Çıkış enerjileri milijoul'lere kadar düşen ve cerrahi operasyonlarda kullanılan modeller mevcuttur. Endüstride en yaygın kullanılanları 100-400 W'lık ortalama güç gurubundadır, en yüksek güç girdileri 6-25 kW arasındadır ve çıkışları sadme başına 5-70 J'dür [15].



Şekil 4.21. Nd-YAG lazerinin optik şeması [7]

YAG lazerin standart versiyonu basit bir rezonatördür ve aşağıdaki elemanlardan oluşur:

- Eliptik bir kavite osilatörü içindeki tek bir lazer çubuğu.
- Çubuğu uyarmak için bir ya da iki flaş lambası.
- %100 yansıtıcı bir arka ayna ve ışının %35-50'sini dağıtıcı optiklere nakleden bir ön çıkış aynası.

Bu tip bir lazer normalde 400 W'lık ortalama güce ve sadme başına 50 J'e kadar enerjiye sahip bir ışın dağıtır. Işın saçılması, 100 mm odak uzaklıklı bir lensle 10 mm ve nokta (spot) boyutu da 0.5- 0.75 mm arasındadır. Odak noktasındaki (en sıcak nokta) ışın yoğunluğu yaklaşık 0.1 milyon W/cm^2 civarında olacaktır.

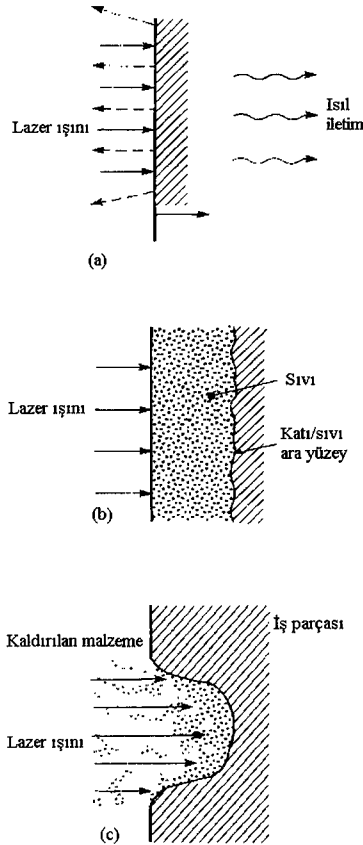
YAG lazerinin en güçlü versiyonları rezonatör içinde bir osilatör-amplifikatör içeren versiyonlardır. Bu esasen her biri bir lazer çubuğu ve bir ya da iki flaş lambası içeren ikili eliptik kavitedir. Yansıtma işlemi esasen basit rezonatördeki benzer ve ışın saçılması yine 10 mm civarındadır. Sadme başına 100 J'ün üzerindeki çıkışları vermek genelde sıra dışıdır. Bu tip lazerler için gerekli güç girdileri 30 kW'a kadar yükselir. Nokta boyutları 100 mm odak uzaklıklı lenslerle tipik olarak 0.5- 0.75 mm arasındadır. İkinci boyut (0.75 mm) daha yüksek çıkışlar içindir. Odak noktasındaki ışın yoğunluğu yaklaşık 0.5 milyon W/cm^2 'ye kadar yükselebilir. [15]

YAG lazerin daha rafine bir versiyonu düşük saçılmalı rezonatördür ve çok modlu lazer ışınından daha yüksek seviyeli modları çıkarmak (arıtmak) için

dahili rezonatör optikleri kullanırlar. Rezonatör içinde kavitenin arkasında ve arka aynanın önünde bulunan bir teleskop işlenmemiş ışını arka ayna üzerine yoğunlaştırır. Yansıtılan ışın teleskop içinden geri dönerek birçok yüksek modlu ışının saçılarak nominal ışın boyutundaki soğutulmuş bir açıklıkta kaybolmasına neden olur. Sonuç neredeyse tamamen TEM00 modundan oluşan, 3 mm ya da daha küçük saçılmaya sahip bir çıkış ışınıdır. Ortalama güç çıkışı yaklaşık 120 W ile sınırlıdır. Çıkış enerjisi kesme işlemleri için 1.6 mili saniye sadme genişliğinde yaklaşık 7 J'dür. Bununla birlikte nokta boyutu, 2 kat ışın genişletici kullanılarak 100 mm'lik odak uzaklıklı lensler ile 0.125 mm dolaylarındadır. Odak noktasında ışın yoğunluğu yaklaşık 1 milyon W/cm² yani daha önce bahsedilen osilatör-amplifikatörünkünün 2 katıdır. Bu değerler 10 kW'lık bir güç girişi ile elde edilir [15].

4.4.2. Lazerin malzemeler üzerindeki etkileri

Şekil 4.22'de [16] görüldüğü gibi lazer ışını iş parçası ile buluştuğunda, ışığın yansınması, emilmesi ve iletilmesi gibi çeşitli etkiler ortaya çıkar.



Şekil 4.22. Lazer ışının iş parçasıyla etkileşimi a) Emme ve ısınma, b)Ergime, c) Buharlaştırma

4.4.2.1. Yansıma

Işının yansıma miktarı lazer yayılımının dalga boyuna ve yüzey kalitesi, oksitlenme miktarı, sıcaklık gibi malzeme özelliklerine bağlıdır. Ayrıca birçok malzemenin belirli dalga boylarındaki yüksek yansıtma özellikleri, bu malzemeleri işleme için uygunsuz hale getirmektedir. Genelde lazer ışınının dalga boyu uzadıkça metallerin yansıtma özellikleri artmaktadır. Bu gözlem, özellikle CO₂ lazerin 10.6 µm'lik dalga boyuyla elde edilen yüksek yansıtma özelliklerini gösteren Çizelge 4.5'deki sonuçlar tarafından doğrulanmıştır. 5 µm'den daha büyük dalga boyları için birçok metal, gelen yayılımın yaklaşık %90'ını düşük güç yoğunluklarında yansıtırlar [16].

Çizelge 4.5. Lazer ışının normal geliş açısında metallerin yansıtıcılıkları [16]

Dalga boyu (µm)	Au	Cu	Ag	Al	Cr	Fe	Ni
0.6943 (Cr ³⁺)	0.930	0.831	0.961	---	0.555	0.575	0.676
1.06 (Nd ³⁺)	0.981	0.901	0.964	0.733	0.570	0.650	0.741
10.6 (CO ₂)	0.975	0.984	0.989	0.970	0.930	---	0.941

Yansıma miktarı iş parçasının yüzey koşullarının tadilatıyla önemli ölçüde azaltılabilir. Örneğin 694.3 nm'lik dalga boyunda bakırın yansıtıcılığı, yüzeyin oksitlenmesiyle %95'den %20'nin altına düşürülebilir [16]. Bununla birlikte yansıtıcılığın azaltılması yüzey tarafından lazer enerjisinin emilmesini arttırarak malzeme üzerinde bir takım istenmeyen etkilere neden olmaktadır.

4.4.2.2. Emme

Yüzeyde yansıtılamayan lazer enerjisi malzeme içine emilir. Metallerde ışığın emilmesi, elektronları metalin iletim bandındaki daha yüksek enerji seviyelerine yükselten dahili bir foto-elektrik etkisi tarafından sağlanır. Bu esnada bir iletkenindeki elektronların çarpışmaları arasındaki ortalama zaman 10^{-14} - 10^{-13} s'dir. Yani 1 nanosaniyede (nsn) elektronlar birbirleriyle 10^{14} - 10^{15} kere çarpışırlar. Bu, en kısa lazer sadmesiyle bile karşılaştırıldığında çok kısa bir aralıktır. Elektronlar tarafından lazer ışınından emilen enerji, hızlı bir şekilde

kafese (sonsuz bant) geçer. Tipik olarak enerji yaklaşık $0.1 \mu\text{m}$ 'lik bir derinliğe (gözle görülür ve kızılötesi dalga boyları için) emilir. Birçok organik bileşik için emmenin $1 \mu\text{m}$ 'den daha küçük bir derinlikte (CO_2 'de kızılötesi yayılım için) gerçekleştiği gözlenmiştir [16].

Özet olarak lazer enerjisi, ısı iletimle enerjinin malzeme içine işlediği bir yüzey etkisi olarak ele alınabilir.

4.4.2.3. Isı iletimi

Işının lazerden iş parçası malzemesine iletimi son derece karmaşık bir etkidir. Sonuç olarak şu ana kadar hiçbir ısı iletimi teorisi lazerle işlemeye yeterli bir şekilde uygulanamamıştır. Bununla birlikte lazerle işlemeyle ilgili faydalı bilgiler basit bir yaklaşımla elde edilebilir. İlk önce iş parçasının izotropik bir malzemeden yapıldığı varsayılır ve bu malzeme içindeki ısı akışı difüzyon denklemiyle tanımlanır. Daha sonra sıcaklık dağılımının bir boyutlu olduğu ve iş parçasının yarı sonsuz olduğu kabulleriyle bu difüzyon denklemi çözülür (difüzyon denklemi ve bu denklemin diferansiyel çözümü konunun amacı dışı olduğundan verilmemiştir). Çizelge 4.6'da yaygın malzemeler için teorik penetrasyon süreleri verilmiştir [16].

Çizelge 4.6. Çeşitli malzemeler için çeşitli derinliklere penetrasyon süreleri [16]

Malzeme	Isıl difüzyon kabiliyeti (cm^2/sn)	Penetrasyon süresi (sn)		
		$x = 0.1 \text{ cm}$	$x = 1.0 \text{ cm}$	$x = 10 \text{ cm}$
Alüminyum	0.91	0.0122	1.22	122
Krom	0.20	0.0557	5.57	557
Bakır	1.14	0.0098	0.98	97.8
Altın	1.18	0.0095	0.95	95
Gümüş	1.71	0.0065	0.65	65
Titanyum	0.082	0.136	13.6	136

4.4.2.4. Yüzeyin ergimesi

Lazer tarafından yeterince ısıtılan iş parçası ergimeye başlar. Çizelge 4.7'de yüzey ergimesinin gerçekleşmesi için gerekli süreler verilmiştir. Bu süreler karmaşık denklemlerden çıkarılmıştır.

Çizelge 4.7. Sabit ısı akışı altında metallerde yüzey ergimesinin başlaması için geçen teorik süreler [16]

Malzeme	Isıl iletkenlik (W/cm ² /°K)	Difüzyon kabiliyeti (cm ² /sn)	Erime sıcaklığı (°K)	Isı akımı altındaki erime süresi (sn)	
				10 ⁴ W/cm ²	10 ⁶ W/cm ²
Alüminyum	2.38	0.91	933	4.24x 10 ⁻²	4.24x 10 ⁻⁶
Krom	0.87	0.20	2176	1.4x 10 ⁻¹	1.4x 10 ⁻⁵
Bakır	4.0	1.14	1356	2.03x 10 ⁻¹	2.03x 10 ⁻⁵
Altın	3.11	1.18	1336	1.15x 10 ⁻¹	1.15x 10 ⁻⁵
Gümüş	4.18	1.71	1234	1.22x 10 ⁻¹	1.22x 10 ⁻⁵
Titanyum	0.20	0.082	1941	1.45x 10 ⁻²	1.45x 10 ⁻⁶

4.4.2.5. Buharlaşma

Lazer tarafından ertitildikten sonra iş parçası yüzeyi buharlaşmaya başlar. Buharlaşma oranı lazerin gelen akışına, iş parçası yüzeyinin gömülme hızına ve iş parçasının birim hacminin buharlaştırılması için gerekli olan enerjiye (tipik olarak 10³ J/cm³) bağlıdır. Örneğin 3 x 10⁸ W/cm²'lik bir gelen lazer akımı iş parçası yüzeyinin yaklaşık 10⁻⁴ cm/sn'lik bir gömülme hızıyla buharlaşmasını sağlar. Bu kadar yüksek yoğunluklu lazer ışınlarında, gelen enerji yüzey derinliği olarak adlandırılan derinliğe kadar emilir. Bu derinliğin 1 µm'den daha az olduğu gözlenmiştir. Yapılan hesaplamalarla buharlaşmanın başladığı ana kadar geçen süre bulunmuştur. Örneğin 10⁻⁴ cm'lik yüzey derinliği ve 3 x 10⁷ W/cm²'lik bir gelen lazer akımı için buharlaşma başlayıncaya kadar geçen süre yaklaşık 10⁻⁸ sn'dir. Yani böyle yüksek lazer akımlarında buharlaşma çok hızlı gerçekleşmektedir [16].

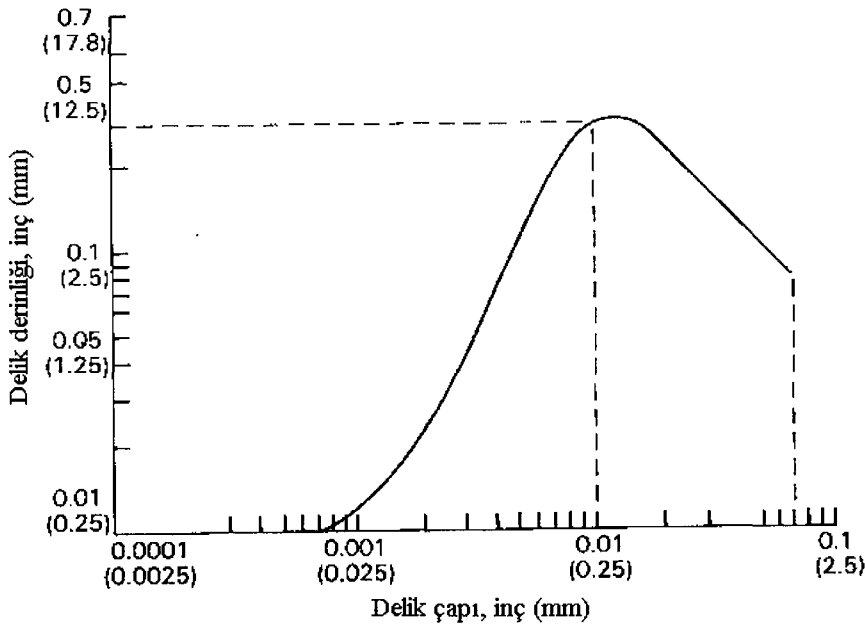
4.4.3. Lazerle işleme uygulamaları

Gelişmiş lazer teknikleri gaz türbinli motorların yanma odası, nozul kılavuz kanatçıkları, pale ve kanatçık gibi elemanlarının parça yenileme işlemlerinde özellikle delme (çarpmayla delme, oyarak delme ve raybalama) ve kesme operasyonlarında ve ısıtıl işlemlerde kullanılmaktadır.

4.4.3.1. Delme

Lazer literatüründe delme, iş parçası içinde bir delik açma anlamına gelir. Yapılan çalışmalar 12.5 mm kalınlığındaki malzemelere 0.127 mm çapında ve 40/1'lik derinlik/çap oranına sahip deliklerin sadmeli lazer ile delinebileceğini

göstermektedir. Şekil 4.23’de delik derinliğinin, ilk başlarda çaptaki genişlemeyle büyüdüğü, fakat penetrasyonun azaldığı bir noktayla sınırlandığı görülmektedir. Gaz türbinli motor komponentleri ve nozul rehber kanatçıkları gibi 1m^3 - 100mm^3 arasında değişen boyutlara sahip komponentler üzerinde 8 mm’ye kadar varan uzunluklarda ve 10/1’lik bir derinlik/çap oranına sahip delikler Nd-YAG lazer ile EDM’den %20-30 daha düşük maliyetlerle üretilmektedir. 0.125-1.25 mm çapındaki delikler çarpma ile delme işlemiyle, 0.25 mm ya da daha büyük çaplı delikler de özel optiklerle oyarak delme işlemiyle delinir [15,16].



Şekil 4.23. Sadmeli lazer ile delinen bir deliğin derinliğinin çapı ile değişimi [16]

Tipik bir gaz türbinli uçak motorunda sert ve ısıya dayanıklı nikel alaşımlı malzemelerden yapılmış komponentlerin soğutulması amacıyla 8 mm’ye kadar metal kalınlığına sahip ve 1.5 mm’den daha küçük çaplı 30000 dolaylarında delik vardır. Bu delikler EDM, ECM teknikleriyle ve Nd-YAG lazer ile delinerek yapılır. Toz metalürjisiyle imal edilmiş parçaların termal metotlarla kaynak yapılamayacağı ve lazer ya da EDM ile delindiklerinde çatlakların oluşabileceği unutulmamalıdır [7].

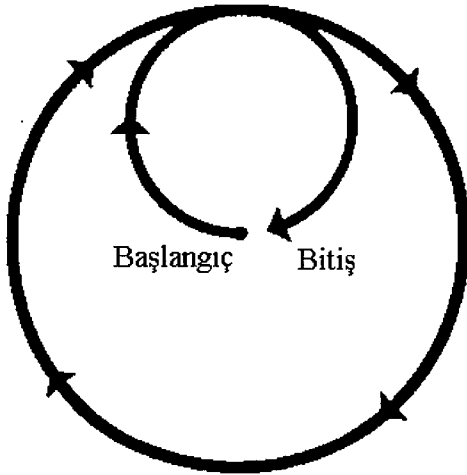
Lazerle delme sadece 1 saniye sürer, fakat bu süre esnasında metalin yüzeyi kaynama sıcaklığına ulaşır. Genişleyen buhar sıvı malzemeyi terk ederek bir krater oluşturur. Daha fazla enerji emilir ve proses devam eder. Üretilen deliklerin ağzı etrafında oluşan ısıdan etkilenmiş bölge (HAZ) biraz konik bir yapıya sahiptir ve dairesellik %5’lik bir tam çemberden fazla değildir. Fakat

deliğin hassasiyetinden ziyade deliklerin tekrarlanabilme sayısı önemlidir. Bazı deliklerin daire yerine oval olması, köşeli (dikdörtgen) olması ya da malzeme yüzeyi ile 15° 'yi aşmayacak şekilde açılı olması istenir. Bir lazer ile kör delik açmak ya da kavitenin bir çeperini diğerine dokunmadan delmek istendiğinde işlemi durdurmak zordur. Bu yüzden böyle durumlarda EDM ya da kılcal ECM ile delme yöntemi kullanılmalıdır [7].

Çarpmayla delme işleminde delik boyutu birkaç parametre tarafından belirlenir. Ayarlanmış bir odak uzaklığı için lambalara giden gücün artırılması delik boyutunu büyütecektir ve gücün azaltılması delik boyutunu küçültecektir. Çok büyük boyut değişiklikleri için ışının farklı derecelerde açılması daha küçük delikler açacak ve iş parçasının üzerinde daha düşük bir güce sahip olacaktır. Daha büyük delikler için geniş bir açıklık kullanılır ve ışının biraz odaklanması osilatör-amplifikatörlü bir lazerle 1.25 mm'ye kadar bir delik açar. Bu tip lazerler 12.5 mm'ye kadar olan malzemeleri birkaç sadme ile delebilir. Uçak motoru parçalarının çarpmayla delinmesi için 1-2 milisaniye sadme genişliğinde 10-15 J'lük sadmeler idealdir. Eğer daha yüksek enerji sadmeleri kullanılırsa malzeme üzerinde mikro çatlaklar gibi hasarların oluşma olasılığı doğar. Çarpmayla delmede sadme hızı delinecek yüzeyle yapılan açığa bağlıdır. Açık küçüldükçe sadme hızı azalır. Bu, kayma etkisinin önlenmesine yardımcı olur. Kayma etkisi, metalin katılaşmadığı ve lazer ışınının kayarak uzunlamasına bir delik ağzına neden olduğu yüksek sadme hızlarında görülen bir sonuçtur [15].

Raybalama, pilot bir deliğin doğrudan delinmesi ve daha sonra lazer parametrelerinin değiştirilerek deliğin istenen çapa büyütülmesi için nokta boyutunun artırılmasıyla oluşur. Kesme işlemi deliklerin üst üste bindirilmesiyle gerçekleştirilir. Oarak delme ise, spot boyutundan daha büyük bir delik açmak için lazer odağının bir yörüngeye oturtulduğu özel bir kesme işlemidir. Burada yapılacak delik ilk önce merkezinden çarpmayla delinir. Daha sonra deliğin kenarlarından dairesel bir kesme işlemi yapılır. Birinci yörünge biraz konik fakat iyi bir delik üretir. İkinci bir yörünge deliği temizler ve konikliği azaltır. Dairesellik çarpmayla delme işlemininkinden çok daha iyidir. Düşük saçılmalı lazer tipleri bu işlem için idealdir.

Oyarak delme delik kalitesini artırır ve delik boyutu, sabit bir lazer noktasında yörüngeyi düzenlenmesiyle programlanabilir. Bu tekniğin dezavantajları lazerin yüksek bir tekrarlanma hızında hassas bir şekilde kontrol edilmesi ve iş parçasının sabit tutulması gereğidir. Oyarak delme deliğın ağızında ve bitiş ucunda paralelliğı iyileştirir ve metaldeki metalürjik etkiler önceden tahmin edilebilir. İnce malzemeler de oyarak delme işlemiyle delinebilir, fakat iş parçasının hareketli olduğı durumlarda oyarak delme uygun değildir. Bir oyma hareketi ve kademeli hareket, lazer ışınının geçtiğı aynalar oynatılarak sağlanır. Böylece odaklanmış nokta oyulacak deliğın çevresi etrafında oynar. Ayrıca koordinat tablasındaki küçük bir kademeli motorun kontrol edilmesiyle de bu gerçekleşir (şekil 4.24). Delme için kullanılan Nd-YAG lazerleri 6kW'dan daha küçük bir girdi ile 200 Hz'de 3 miliradyanlık bir ışın saçılmasıyla ortalama 120 W çıkış gücü verir [7].



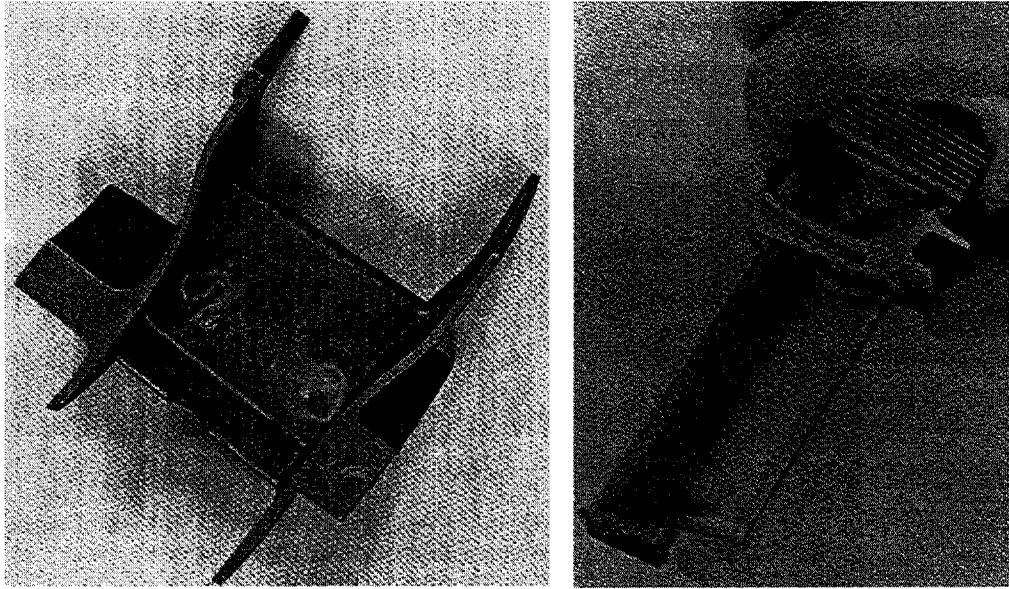
Şekil 4.24. Lazer spotunun yörüngesi [7]

Birçok üretici pale ve kanatçıkların içinde bir zemin malzemesi kullanırlar. Böylece deliğın karşı iç duvara ulaşması önlenir. Bu zemin malzemelerinin bir kısmı yanıcıdır. Yanıcı bir malzeme kullanıldığında oyma tekniğı kullanılamaz. Bununla birlikte teflon zemin oyarak delme işlemine uygundur.

Şekillendirilmiş delikler türbin paleleri ve kanatçıkları üzerindeki akışın optimizasyonu için göz önünde bulundurulmuştur. Burada önemli olan bu deliklerden çıkan soğutma havasının, daha verimli bir soğutma için yüzey üzerine yönlendirilmesi ya da yayılmasıdır. Bu iş tipik olarak şekilli elektrotları kullanan EDM yöntemi ile yapılır. Lazerler, çok karmaşık olmayan deliklerin girişini

şekillendirerek ya da karmaşık şekilli bir delikten malzemenin büyük bir kısmının kaldırılarak daha sonra EDM yöntemiyle deliğe son şeklinin verilmesiyle işlem süresini kısaltabilirler. Düşük saçılmalı lazerler bu işlem için uygundur.

Çoğu durumda hem çarpmayla delme hem de oyarak delme modunda kesme için argon veya delme için oksijen gibi eşeksenli bir yardımcı gaz, çentiklerin temizlenmesi ve döküntülerin (debris) delme bölgesinden kaldırılması için gereklidir. Gaz yardımı diğer bir önemli işi de gerçekleştirir. Doğru şekilde tasarlanmış bir nozul ile kombine olarak odaklayıcı optikleri temiz tutar. Gaz yardımıyla beraber, lens ile iş parçası arasına yerleştirilen ucuz bir cam pencere lens değişim gereklerini ortadan kaldırır ve optik değişimini azaltır. Şekil 4.25 'de lazer ile delinmiş motor komponentleri görülmektedir.



Şekil 4.25. Lazer ile açılmış soğutma delikleri bulunan türbin kanatçığı ve palesi [15]

4.4.3.2. Kesme

Malzemelerin kesilmesi ya da dilimlenmesi lazerler için iyi bir uygulamadır. Kesme işlemi çok hızlı olabilir, malzeme üzerinde çok dar çentiklere sahip konturlar ve keskin köşeler bırakır ve çok az çapak giderme işlemi gerektiren, neredeyse tam bitmiş kesikler sağlar.

Kesme işlemi bir deliğin malzemeden kesilerek çıkarıldığı oyarak delme işlemine benzer. Bu durumda kesme işlemi stok malzemenin kesilmesi ya da genelde stok malzeme üzerinde herhangi bir programlanmış şeklin kesilerek

çıkarılmasında kullanılır. Kesme işlemi saniyede 20-50 sadme ya da daha yüksek sadme hızında çalışan bir sadmeli YAG sistemiyle gerçekleştirilir. Besleme hızı ya da kesme hızı sadme hızıyla uyuşur. Böylece sadmelerin üst üste bindirilmesi parçada istenen parlaklığı sağlar. Delme işleminde olduğu gibi 1-2 milisaniyelik sadme genişlikleri kullanılır [15].

6 mm ya da daha ince stoklar için 5-7 J'lük enerji temiz bir kesme işlemi için yeterlidir. Bu nedenle dar çentik ve yoğun nokta sayesinde düşük saçılmalı bir lazer idealdir. Daha kalın malzemeler için daha çok enerji gerekir. Bu yüzden bir osilatör-amplifikatör tipi lazer gerekir. Yüzey noktasının çok yoğun olmamasına rağmen, 0.5-0.75 mm'lik nokta boyutu 25.4 mm kalınlığa kadar malzemeleri kesebilir. Bu durumda 50 J seviyelerindeki enerji 2 milisaniye sadme genişliğinde verilir [15].

Kesme işlemlerinde de yardımcı gaz (bu genelde hava ya da demir ve alaşımları için oksijendir) kullanışlıdır. Yardımcı gaz malzemenin kesilmesine yardımcı olduğu gibi, doğru tasarlanmış bir nozul ile birlikte kullanıldığında lensi temiz tutar. Delme işleminde olduğu gibi ucuz koruyucu cam pencereler de lensi korur fakat gaz yardımı camın değişme sayısını azaltır.

Kesme işlemlerinde YAG lazerin yanında gaz lazerler de kullanılabilir. Çizelge 4.8'de uçak motor endüstrisinde kullanılan bazı çelik ve alaşımların oksijen destekli CO₂ lazeri ile kesme sonuçları görülmektedir.

Çizelge 4.8. Lazer ile kesme verileri [16]

Malzeme	Kalınlık (mm)	Lüle çapı (mm)	Oksijen basıncı (bar)	En iyi veya optimum kalitede kesme için maksimum besleme hızı (mm/sn)
Ti.6Al.4V ve Ti.6Al.6V.2Sn	0.63 1.27 12.70	0.66 0.66 0.89	2.8 2.8 4.1	127 110 17
Rene 41	0.51 1.27	0.79 0.89	2.8 2.8	34 13
Hastelloy X	0.51 1.27	0.79 0.89	2.8 2.8	34 13
Haynes.188	0.51 1.60	0.79 0.79	2.8 2.8	42 4

Çizelge 4.8. Lazer ile kesme verileri (devam)

Malzeme	Kalınlık (mm)	Lüle çapı (mm)	Oksijen basıncı (bar)	En iyi veya optimum kalitede kesme için maksimum besleme hızı (mm/sn)
TD.Ni.Cr	0.38	0.79	0.89	4.1 5.5
	1.52	0.89	4.1	8
4340 çelik	1.60	0.79	0.89	2.8 4.1
	3.18	0.79	0.89	4.1
410 paslanmaz çelik	1.60	0.79	0.89	4.1
	3.18	0.79	0.89	4.1 5.5
Lazer çıkış gücü: 250 W, Lens: 64 mm odak uzaklıklı (yüzeyde 0.127 mm spot çapı), nozul aralıkları: 0.51±0.25 mm, yardımcı gaz: oksijen.				

4.4.3.3. Isıl işlem

Isıl işlemde bir lazerin avantajı oldukça küçük bölgelere bir kerede ısıtma işlemi uygulayabilme yeteneğidir. Böylece kullanıcının ihtiyacına göre şeritler, noktalar ya da sertleştirilmiş veya tavllanmış seçili yüzeyler yaratır.

Herhangi bir YAG lazeri birçok malzemeyle, özellikle çeliklerle iyi uyum sağladığından ısıtma işlemi operasyonları için uygundur. Sistem 1 cm² civarındaki bölgeleri kapsamak için genelde odaktan biraz dışarıda, kaynak modunda çalıştırılabilir. Bu uygulamalarda saat yönünde operasyon arzu edilir fakat esas değildir. CO₂ sistemleri güç gereksinimlerinin onlarca kW'a çıktığı geniş parçalar için uygundur.

Bu işlem için gaz yardımı kullanışlı olabilir ya da gerekmez. Genelde bu işlemde optiklerin kirlenme tehlikesi yoktur. Bununla birlikte demir içeren ya da oksitlenebilen malzemeler, oksitlenmenin bir sorun olabileceği kadar yüksek sıcaklıklara ısıtılabilir. Bu durumlarda küçük bir soy gaz akışı kullanışlı olabilir.

4.5. HİBM'nde F110-GE-100/129 Motoruna Uygulanan Gelişmiş İşleme Yöntemleri

HİBM Jet Revizyon Müdürlüğü'nde, yapılan kontroller sonucunda hasarlı oldukları belirlenen F110-GE-100/129 motorlarının komponentlerine ECM, EDM, ECG ve lazerle işleme yöntemleri kullanılarak bir takım yenileme işlemleri uygulanmaktadır. Bunlara örnek olarak HPT paleti ve HPT nozul kanatçığı üzerinde EDM ile açılan soğutma delikleri (şekil 4.26 ve 4.27), ECG ile

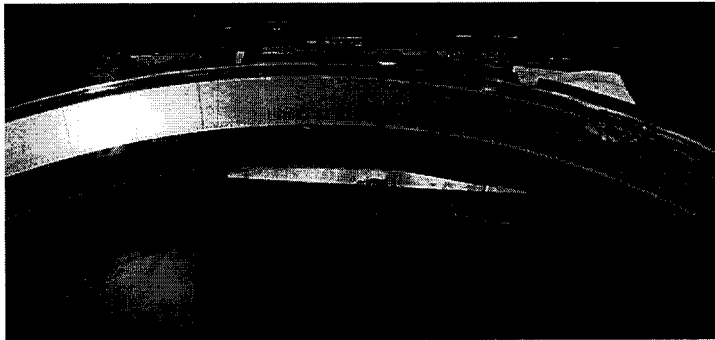
taşlanan HPT dış çemberi (HPT shroud) ve HPC contası (şekil 4.28 ve 4.29), yanma odasına uygulanan EDM işlemi (şekil 4.30), YAG lazeri ile kesme işlemi uygulanan LPT nozul dış çemberi (LPT nozzle shroud), EDM ile çürütülen LPT nozul kanatçıkları (şekil 4.31), ECG ile taşlanan bal peteği conta (şekil 4.32) verilebilir. Şekil 4.33'de ise YAG lazer tezgahı görülmektedir.



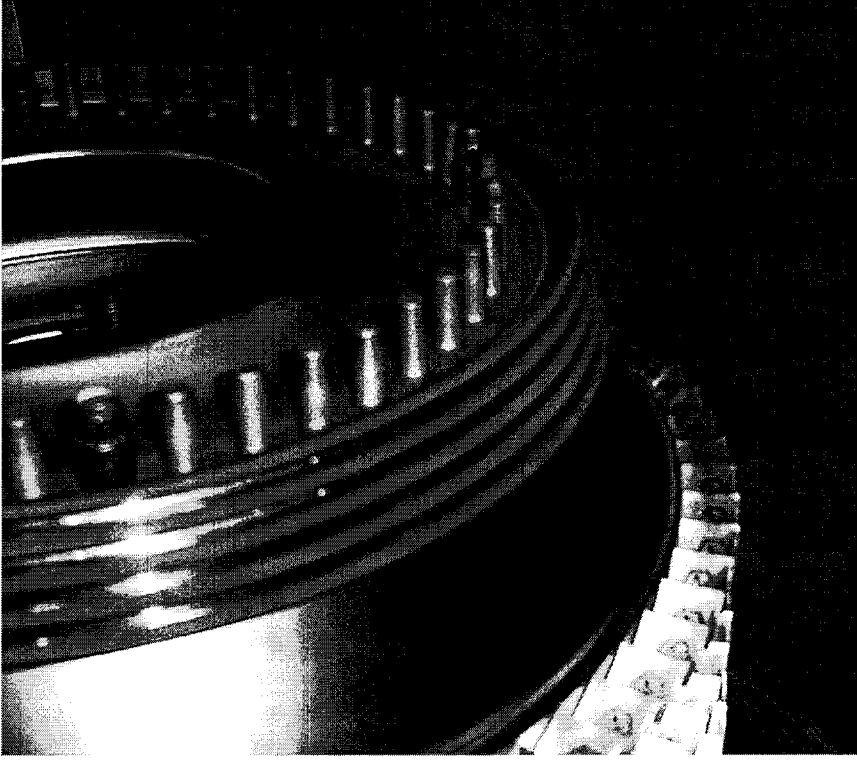
Şekil 4.26. HPT palesi üzerinde EDM ile açılmış soğutma delikleri



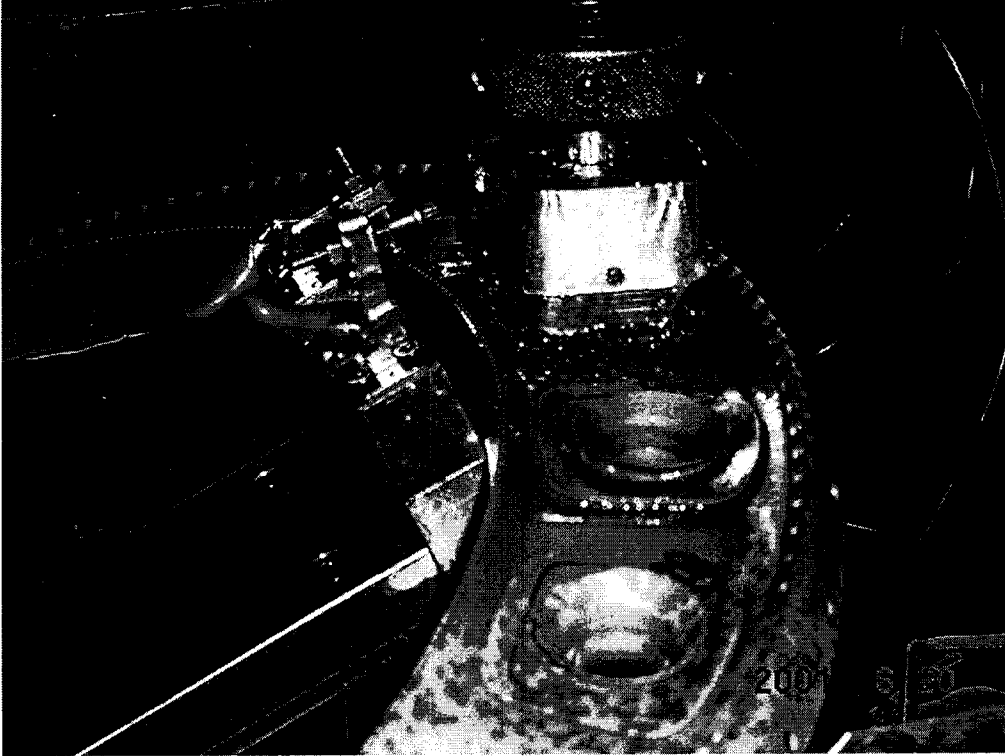
Şekil 4.27. HPT nozul kanatçığı üzerinde EDM ile açılmış soğutma delikleri



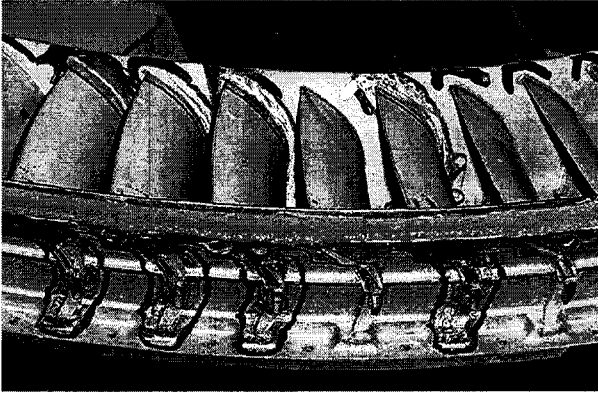
Şekil 4.28. ECG ile taşlanan HPT dış çemberi (HPT shroud)



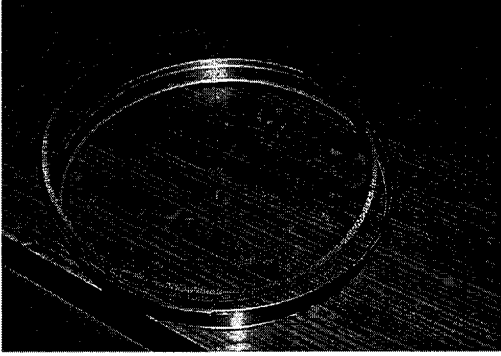
Şekil 4.29. ECG ile taşlanan HPC contası (HPC air seal)



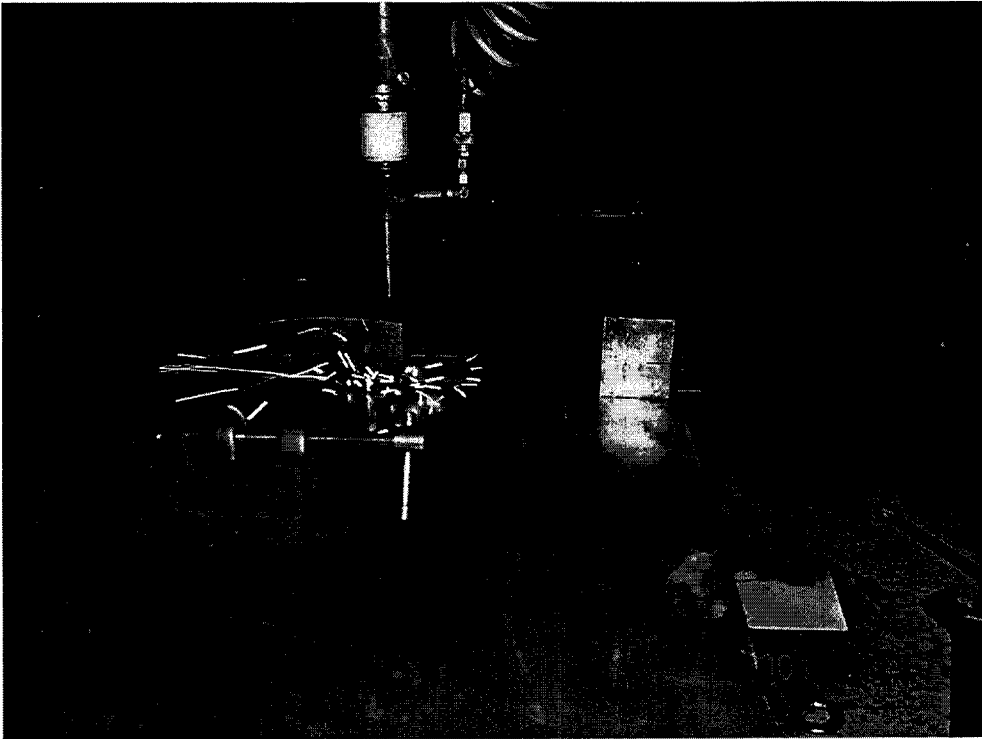
Şekil 4.30. Yanma odasına (combustion chamber dome) uygulanan EDM işlemi



Şekil 4.31. EDM ile çürütülen LPT nozul kanatçıkları



Şekil 4.32. ECG ile taşlanan bal peteği conta (honeycomb seal)



Şekil 4.33. YAG lazer tezgahı

5. KORUYUCU KAPLAMALAR

Gaz türbinli motorlar daha yüksek çalışma sıcaklıklarında daha iyi güç çıkışı ve verim vermektedirler. Türbin pale malzemesi olarak kullanılan süper alaşımlar sadece 1000°C'ye [26] kadar olan çalışma sıcaklıklarında makul bir kullanım ömrüne sahiptirler. Oysa gelişmiş itki sistemlerinde türbin giriş sıcaklıkları 1700°C'ye kadar yükselebilir ve metalik yapıların 1200°C gibi yüksek sıcaklıklara dayanmaları beklenir [26]. Şu anda kullanımda olan hiçbir rotor ya da stator kanatçığı kaplanmadığı müddetçe bu yüksek derecede korozif ve yüksek sıcaklıklı ortamda uzun ömürlü olamaz. Bu nedenle zemin malzemesini korumak ve pale, kanatçık gibi komponentlerin istenen performansı ve tasarlanan ömürlerini garantilemek için yüzey kaplamalarının kullanılması gerekmektedir.

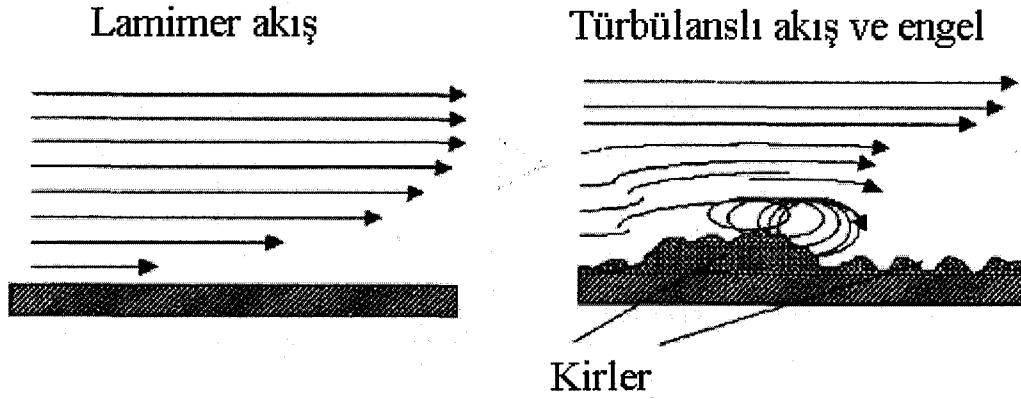
Akışkanlar mekaniği üzerine yapılan çalışmalar bir gaz türbininin 15 kademeli aksenal akışlı kompresör bölümünde aerodinamik sürüklemeye kaynaklanan kayıpların %3'e kadar yükseldiğini göstermektedir [27]. Bu rakam küçük gözükmese de, bu kayıplar çok önemli etkilere sahiptir. Bir gaz türbininin çalışma verimindeki küçük bir kayıp, motorun yüzlerce galon daha fazla yakıt yakmasına neden olur. Bu ilave yakıt filodaki motor sayısı ile çarpıldığında maliyetler oldukça yükselecektir.

Motor içindeki aerodinamik kayıplar ayrıca egzoz gazlarının sıcaklığını da yükseltir. Yüksek sıcaklıklar motor komponentlerinde daha fazla aşınma ve yorulmaya neden olarak komponent ömrünü kısaltır ve bakım maliyetlerini artırır.

Bir motordaki aerodinamik sürüklemenin önemli kısmı kompresörde oluşur ve profil yüzeylerindeki pürüzlerden kaynaklanır. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça sürüklenme de artar. Çalışma esnasında kompresör bölümündeki aerodinamik sürüklenme, kirlenmeden (fouling) dolayı artar. Kirlenme hareket halindeki akışkan (gaz türbinindeki hava gibi) ile temas eden yüzeylerde oluşan birikmedir. Akışkanın laminar akışını bozar ve gaz yolunun kesit alanını daraltır (şekil 5.1).

Kompresör profillerinde rastlanan en yaygın kirlenme korozyondur. Korozyonu, dolayısıyla kompresör profillerinin kirlenmesini önlemek için

korozyona ve erozyona dayanıklı, pürüzsüz kaplamalar uygulamak iyi bir yöntemdir.



Şekil 5.1. Kirlemenin etkisi [27]

Yenileme işleminin sonunda bu kaplamalar, komponentlerin orijinal imalatındakine benzer teknoloji ve ekipman kullanılarak tekrar yapılmalıdır. Codep gibi geleneksel alüminid yöntemler ve kaplamalar yerini çok daha pahalı alüminidlere, kimyasal buhar birikimi (CVD), alçak basınçlı plazma sprej (LPPS), yüksek hızlı oksji-yakıt sprej (HVOF) ve elektron ışınıyla fiziksel buhar birikimi (EB-PVD) teknolojileri tarafından uygulanan MCrAlY ve termal bariyer kaplamalara (TBC) bırakmıştır. Bu teknolojilere birçok onarım istasyonu sahip değildir. Bu kaplama ekipmanının ve teknoloji lisanslarının mevcudiyeti, gelişmiş motorların sıcak bölümlerine yenileme işlemleri uygulama yeteneğine sahip onarım istasyonlarının sayısını sınırlamaktadır [9].

Gaz türbinli motor komponentlerine uygulanan kaplama yöntemleri için kesin bir sınıflandırma bulunmamakta ve farklı kaynaklarda farklı sınıflandırmalara rastlanmaktadır. Örneğin bir sınıflandırmada kaplamalar; difüzyonlu kaplamalar, MCrAlY üst yüzey kaplamaları (overlay coatings) ve termal bariyer kaplamalar (TBC) olarak üç ana grupta toplanmış, difüzyonlu kaplamalar da kendi arasında basit ve geliştirilmiş difüzyonlu kaplamalar olarak ikiye ayrılmıştır [28,29]. Bir diğer sınıflandırmada ise kaplamalar; metalik kaplamalar ve seramik bazlı termal bariyer kaplamalar olarak iki ana grupta toplanmış ve metalik kaplamalar kendi aralarında difüzyonlu kaplamalar ve üst yüzey kaplamalar olarak ikiye ayrılmıştır [30]. Başka bir sınıflandırmada ise kaplamalar; akımsız nikel kaplama, anodik uygulamalar, elektrolitik kaplama,

kimyevi uygulamalar ve metal püskürtme yöntemi şeklinde beş grupta incelenmiştir [31].

Çalışmanın bu bölümünde, kaplama yöntemlerinin sınıflandırması konusundaki farklı yaklaşımlardan dolayı, jet motorlarına parça yenileme işlemi olarak en sık uygulanan gelişmiş kaplama yöntemleri herhangi bir sınıflandırma yapılmaksızın incelenmiş ve uygulama alanlarına örnekler verilmiştir.

5.1. Difüzyonlu Kaplamalar

Alüminid bazlı kaplamalar ya da paket alüminid kaplamalar olarak da adlandırılan difüzyonlu kaplamalar, kendi aralarında basit difüzyonlu kaplamalar ve geliştirilmiş difüzyonlu kaplamalar olarak ikiye ayrılır.

5.1.1. Basit difüzyonlu kaplamalar

Alüminid kaplamalar en çok gaz türbini uygulamalarındaki nikel ve kobalt bazlı süper alaşımları korumak için kullanılır. Genelde paket sementasyon, sıvı füzyon veya kimyasal buhar birikimi (CVD) yöntemlerinden oluşmakla beraber en yaygın yöntem paket sementasyon yöntemidir [29,30]

Paket sementasyon yönteminde komponentler kısmen yalıtılmış bir damıtma haznesinin içindeki toz karışımına daldırılırlar. Damıtma haznesi daha sonra bir fırın içine yerleştirilir ve koruyucu bir atmosfer altında yüksek sıcaklıklara (750°C-1150°C) ısıtılır. Alüminyumlama işleminde alüminyum, paketten zemin yüzeyine transfer edilir ve burada zemin ile difüzyona girerek bir alüminid tabakası oluşturur (difüzyon, kaplama atomlarının ya da moleküllerinin denge kurulana kadar zemin içine ya da ters yönde anlık yer değiştirmesidir). Formasyonun bu şekilde olmasından dolayı bu teknik “reaktif kimyasal buhar birikimi” (CVD)’nin özel bir durumudur. Paket sementasyon basit bir işlemdir. Kolayca kontrol edilebilir ve işletim maliyetleri düşüktür. Bu avantajları sayesinde süper alaşımların korunmasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat formasyon şeklinden dolayı çeşitli sınırlamalara maruzdur. Kaplama kompozisyonları ve yapılarının çeşitliliği sınırlıdır. Uygulamada sadece bir element paketten gaz fazında transfer edilebilir ve bazı uygulamalarda yüzeyin sadece alüminyumla değil ayrıca krom, itriyum vb. ile de zenginleştirilmesi tercih

edilir. Dahası zemin alaşımasının kompozisyonu ve yapısı kaplamanın performansını ciddi bir şekilde etkilemektedir [29,30].

Düşük sıcaklıklı paket alüminid kaplamalar ilk defa 1960’larda askeri motorların kompresör kanatçıklarında, statorlarında ve palelerinde kullanılmıştır. Diğer difüzyonlu kaplamalara karbon bazlı malzemeler için silikon karbit ve niobiyum alaşımları için de silisidler örnek verilebilir [29,32].

5.1.2. Geliştirilmiş difüzyonlu kaplamalar

Daha önce belirtildiği gibi paket sementasyon işleminin uygulanabileceği kompozisyon ve yapılar sınırlıdır. Bununla birlikte birtakım uygulamalarda reaktif CVD yönteminin avantajlarından (özellikle karmaşık geometrilere düzgün kalınlık sağlaması) yararlanılabilir, fakat korozyon direncini arttırmak için kaplama kompozisyonunu geliştirmek gerekir. Alüminid kaplamaları geliştirmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar alüminyumlama işleminden önce uygulanan “ön işlem” (pretreatment) veya “ön biriktirme” (predeposit) işlemleri ve “birlikte biriktirme” (codeposition) işlemidir. Tipik bir ön işlem, krom bakımından zenginleştirilmiş bir alüminid kaplama elde etmek için alüminyumlama işleminden önce kromlama işleminde gerçekleşir. Cr ile geliştirilmiş alüminid kaplamalara örnek olarak C1A (SNECMA) ve PWA 32 verilebilir [29].

Tek basamaklı sementasyon işlemi esnasında iki ya da daha fazla elementin birlikte birikimi uzun zaman önce keşfedilmesine rağmen endüstriyel uygulamada çok yaygın bir teknik değildir. Çeliğin krom ve silikon ile sementasyonu 1945’lerde gerçekleştirilmiştir. Son zamanlarda yapılan ve termodinamik hesaplamaları temel alan çalışmalar Cr ve Al’nin nikel bazlı ya da demir bazlı alaşımlarda birlikte birikiminin uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Alüminyum ile itriyum gibi aktif bir elementin birlikte birikimi esnasında bir takım zorluklarla karşılaşmaktadır. Bunun bir nedeni, bu elementin nikel ya da demir bazlı alaşımlarda düşük bir çözünürlüğe sahip olmasıdır. Bir ön işlem ile üçüncü bir elementin katılması platin katkılı kaplamaları geliştirmiştir. Genelde platin 8 mikron kalınlığında bir tabaka şeklinde elektroliz yoluyla birikir [29].

Difüzyonlu nikel kadmiyum kaplamalar 1970'lerin sonuna kadar hem havacılıkta hem de endüstriyel uygulamalarda kullanılan gaz türbinli motorların kompresör profilleri için en yaygın kaplama olmuştur. Daha sonra yerini mükemmel bir korozyon direncine sahip metalik-seramik kaplamalara bırakmıştır. NiCd kaplamalar çelik zemin üzerine ilk önce bir tabaka nikelin elektroliz ile kaplanması ve sonra onun üzerine bir tabaka kadmiyum kaplanmasıyla uygulanır. Daha sonra kadmiyum 330°C'de nikel içine difüze edilir. Nikel tabakası erozyon direnci sağlarken, kadmiyum kaplamaya fedakarlık (sacrificial) özelliği kazandırır. Yani kaplama zarar gördüğünde ana malzeme yerine korozyona maruz kalan tabaka görevi görür [29,32].

5.2. MCrAlY Üst Yüzey Kaplamaları

Kompozisyonları ve yapıları zeminden tamamen farklı MCrAlY alaşımları, elektron ışınıyla fiziksel buhar birikimi (EB-PVD) ve kontrollü atmosfer altında plazma sprete teknikleri sayesinde iyi bir şekilde yüzey üzerinde biriktirebilmektedir. Burada M harfi metalik kelimesinden gelir ve genelde kobalt (Co), nikel (Ni) veya demir (Fe) olan bir ya da daha fazla metalik elementi temsil eder. Cr kromu, Al de alüminyumunu temsil etmektedir. Son harf bazı durumlarda X'dir ve itriyum (Y) ya da toryum (Th) gibi nadir toprak elementlerini temsil eder. Genelde gaz türbinli motorların sıcak bölüm komponentlerine çok katmanlı termal bariyer kaplamalarla birlikte uygulanır [29,30,33].

5.3. Metalik-Seramik Kaplamalar

Alüminyum-seramik kaplamalar olarak da bilinen bu kaplamalar temelde, metalik fosfat ve kromatlardan oluşan asitik bir solüsyon içinde dağılmış alüminyum toz pigment parçacıklarından oluşan su bazlı çamurlardır. Bu bulamaç (çamur) temiz ve kumlanmış bir metale püskürtülüp 345°C'ye ısıtıldığında alüminyum parçacıkları elektrik geçirmeyen bir seramik bağ ile birbirlerine yapışarak bir kaplama oluştururlar. Alüminyum-seramik kaplamaların temel özellikleri şu şekilde özetlenebilir [27,32,34-36]:

- Su bazlıdır, kimyasal çözücü (solvent) içermezler.
- Demir içeren tüm alaşımlarda fedakarlık özelliğine sahiptirler.

- 871°C'ye kadar sıcaklığa dayanıklıdırlar.
- Termal şok direncine sahiptirler.
- Suyu, yağlara, greslere, hidrolik sıvılara ve diğer organik çözücülerin çoğuna karşı dayanıklıdırlar.
- Parçacık korozyonuna karşı dayanıklıdırlar.
- Düzgün ve düşük profilli bir film oluştururlar.

Bu tür kaplamaların en temeli Sermatec şirketi tarafından geliştirilmiş SermeTel W'dir. Bu kaplama alçak basınçta kumlandığında yalıtkan seramik tabaka kaldırılarak kaplama iletken hale getirilir. Bu işleme parlatma (burnishing) adı verilir. SermeTel W-Class 4 buna bir örnektir ve özellikleri çizelge 5.1'de verilmiştir. Kaplamanın iletkenliği, kaplamaya fedakarlık özelliği kazandırır. Kaplamalarda fedakarlık, daha az aktif baz metal üzerindeki aktif bir kaplama tabakasının tercihen korozyona uğraması olarak tanımlanır. Çinko, kadmiyum ve alüminyum en yaygın fedakar metallerdir. SermeTel W-Class 4 türbin ve kompresör kaplamaları için mükemmel bir adaydır, fakat kaplamaların pürüzlülüğü nedeniyle 1970'li yıllara kadar kompresör gövdelerinde, ara halkalarda (spacer), disklerde ve şaftlarda kullanılmıştır [34].

Çizelge 5.1. SermeTel W-Class 4 kaplamaların tipik özellikleri [34]

Kalınlık	12.5 - 75 mikrometre.
Yüzey kalitesi	1.4 mikron AA.
Tuz sprey korozyon direnci (ASTM B117)	Kırmızı pas olmaksızın 1000 saatten fazla (1010 çelik üzerine 50 µm'lik kaplama).
Erozyon direnci (ASTM D968)	40 litre/mikrometreden fazla.
Galvanik potansiyeli	-0.730 - 0.760 volt (%5 NaCl 20° C Kalomel elektrot).

1970'lerin ortalarında SermeTel W-Class 4'ün yüzey pürüzlülüğü iyileştirilerek SermeTel Process 5375 geliştirilmiştir. Cilalanan parçalar titreşimli yüzey işleme makinelerinde işlenerek yüzey kalitesi artırılmıştır [34].

Cilalanmış (Class 4) kaplamaların yüzey kaliteleri artırıldıktan sonra korozyona karşı dirençlerini artırma çalışmaları başlamıştır. Bu kaplamalar galvanik olarak aktif ve fedakardırlar. Fakat kaplamanın bu özelliği beyaz korozyon ürünleri üretmiştir ve bu korozyon hem kaplamanın ömrünü azaltmış hem de yüzey kalitesini bozmuştur. Bunun üzerine kaplamalar bir üst kaplama

(top coat) ile kaplanmıştır. Üst kaplama, bir kaplama sisteminde en son kaplama olması istenen kaplamadır. Bunun sonucunda Process 5380 ve 5380 DP geliştirilmiştir. Bu kaplamaların özellikleri çizelge 5.2 ve 5.3’de verilmiştir. Process 5380’de baz kaplama (base coat) olarak Sermetel W’nin geliştirilmiş versiyonları olan SermeTel WFX ve SermeTel WFW-L katmanları, üst kaplama olarak da kromat/fosfat SermeTel 565 kullanılmıştır. Process 5380’in erozyon direncini arttırmak için Process 5380 DP geliştirilmiş ve baz kaplama olarak SermeTel 962 kullanılmıştır (baz kaplama, yüzeye herhangi ilave bir kaplamadan önce uygulanan ilk kaplamadır) [34].

Çizelge 5.2. Process 5380’in özellikleri [34]

Kalınlık	12.5 - 75 mikrometre.
Yüzey kalitesi	0.25 mikron AA’dan küçük.
Tuz sprej korozyon direnci (ASTM B117)	Kırmızı pas olmaksızın 2500 saatten fazla (1010 çelik üzerine 50 µm’lik kaplama).
Erozyon direnci (ASTM D968)	120 litre/mikrometreden fazla.
Galvanik potansiyeli	-0.730 - 0.760 volt (%5 NaCl 20° C Kalomel elektrot).

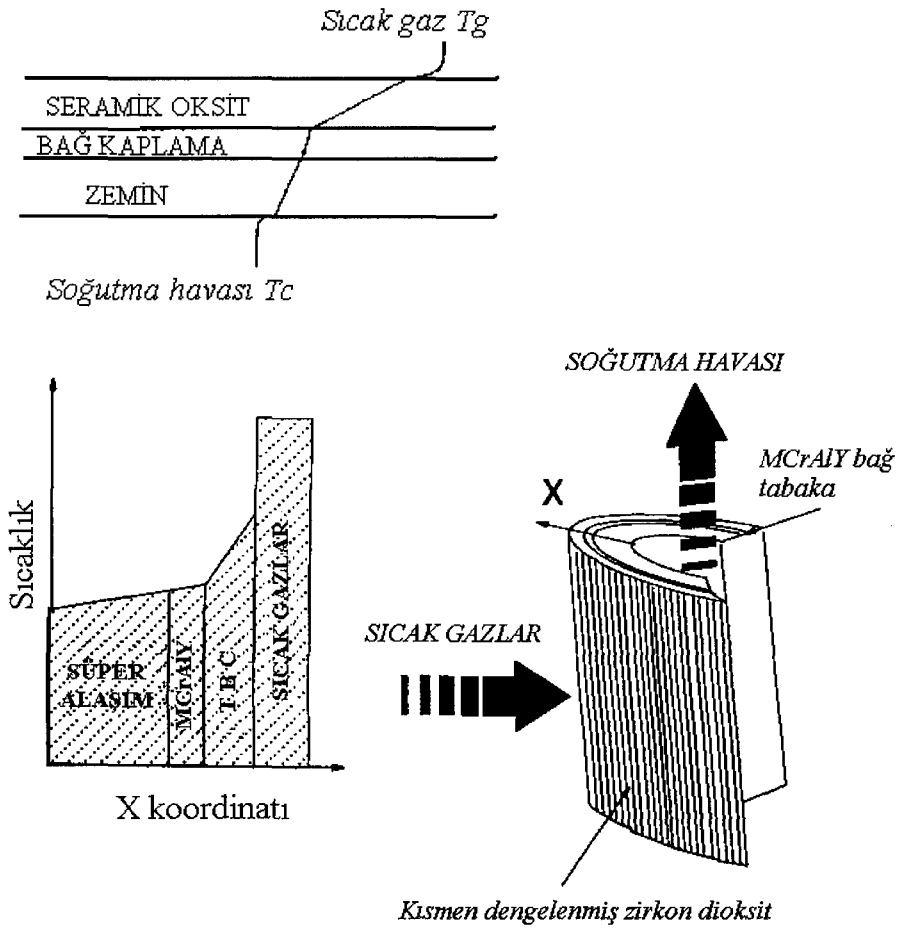
Çizelge 5.3. Process 5380 DP’nin özellikleri [34]

Kalınlık	12.5 - 75 mikrometre.
Yüzey kalitesi	0.25 mikron AA’dan küçük.
Tuz sprej korozyon direnci (ASTM B117)	Kırmızı pas olmaksızın 2500 saatten fazla (1010 çelik üzerine 50 µm’lik kaplama)
Erozyon direnci (ASTM D968)	200 litre/mikrometreden fazla
Galvanik potansiyeli	-0.730 - 0.760 volt (%5 NaCl 20° C Kalomel elektrot)

5.4. Termal Bariyer Kaplamalar

Termal bariyer kaplamalar, gelişmiş türbinli motorların sıcak kısım komponentlerinde kullanılan ve daha önce mümkün olandan daha yüksek türbin giriş sıcaklıkları sağlayan kaplamalardan birisidir. Bir termal bariyer kaplama (TBC) sistemi, temel amacı zemin malzemesini gaz akışının sıcaklığından korumak olan bir ya da daha fazla kaplama tabakasından oluşur. Düşük bir termal iletkenliğe sahip bir tabaka oluşturarak durgun hal (steady state) çalışmaları esnasında zemin sıcaklığını düşürür. Bunun etkin olması için sıcak gaz tarafından süpürülen yüzey ile içerideki daha serin zemin yüzeyi arasında bir sıcaklık gradyanı oluşmalıdır. Bu genelde durgun hal çalışmaları esnasında iç kısımdaki

zemin yüzeyine yönlendirilmiş soğutma havası kullanılarak gerçekleştirilir (şekil 5.2).

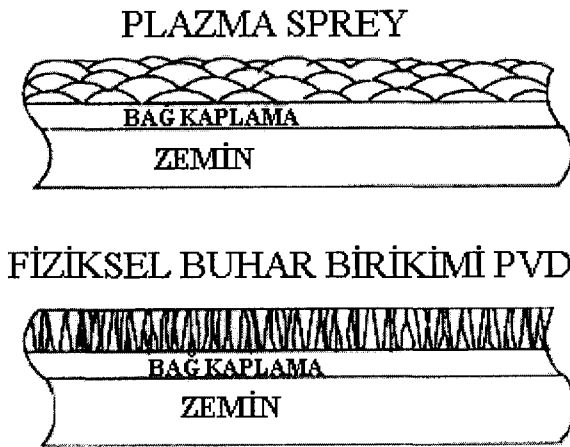


Şekil 5.2. TBC'de sıcaklık dağılımı [33,37]

Termal bariyer kaplamalar ince (300-1500 μm) seramik bir izolasyon tabakası (üst kaplama) ve seramik ile zemin arasındaki metalik bir iç tabakadan (bağ kaplama) oluşur. Komponentler dahili olarak soğutulduğunda üst kaplama, seramik tabakanın iç ve dış yüzeyleri arasında 50-150°C'lik bir sıcaklık gradyanı oluşturur. Son derece düşük ısı iletkenliğinden dolayı zirkon oksit (ZrO_2) normalde izolasyon tabakası, yani üst kaplama (top coat) için baz malzeme olarak kullanılır. İtiryum oksit, magnezyum oksit ve kalsiyum oksit de ayrıca termal çevrim esnasında kübik ZrO_2 'nin transformasyonunu önlemek için kullanılır. Fakat endüstri geniş ölçüde %8 itriyum oksit ile kısmen dengelenmiş zirkon oksit üzerinde standartlaşmıştır. Bağ kaplama genelde bir MCrAlY tabakasından oluşur. Bağ kaplama (bond coat) kendinden sonra yapılacak kaplamaların

bağlılığını arttırmak ve üst kaplamanın performansını iyileştirmek için yapılan kaplamalardır. Bir termal bariyer kaplama sisteminde bağ kaplamanın temel rolü, metal zemin ile seramik üst kaplama arasında iyi bir yapışma sağlamak ve alttaki zemin alaşımına iyi bir oksidasyon koruması sağlamaktır [29,30,33,37].

Hava plazma spreyi ve fiziksel buhar birikimi olmak üzere iki temel termal bariyer kaplama yöntemi vardır. Bunların yanında yüksek hızlı oksi-yakıt sistemleri de bazı uygulamalarda kullanılmaktadır. Hava plazma sprey kaplamalar; doğrudan hava içinde (APS), argon koruyucu örtü ile çevrelenmiş bir şekilde (ASPS) ya da düşük basınçlı bir vakum odası içinde (LPPS) vb. yollarla uygulanabilir [29,30,33]. Bu yöntemler termal sprey kaplamalar başlığı altında daha detaylı bir şekilde incelenmiştir. Hava plazma sprey sistemleri, bir sprey tabancasından çıkan plazma damlacıklarının yüzeye çarparak istenen termal gradyana ulaşmak için safha safha birikerek bir kalınlık oluşturması prensibine dayanır. Fiziksel buhar birikimiyle kaplama, hava plazma sprey sistemlerinden çok farklı bir morfolojiye sahiptir (şekil 5.3). Bağ kaplama yüzeyinden yukarıya doğru sütunlar şeklinde bir yüzey oluşturur. Sütunlar zayıf bir yanal bağa sahip olduklarından, gazın yüzeye sızarak ara yüzeyde oksitlenmeye neden olması daha kolaydır. Ayrıca bu geçitler daha iletken malzeme ve buna bağlı olarak da belli bir kalınlık için daha düşük sıcaklık gradyanlarıyla sonuçlanır. Buna karşı yapı zemine daha iyi bir yapışma sağlar. Çünkü spreyli sistemlerdeki fiziksel bağ yerine, kimyasal bir bağ oluşturur [33].



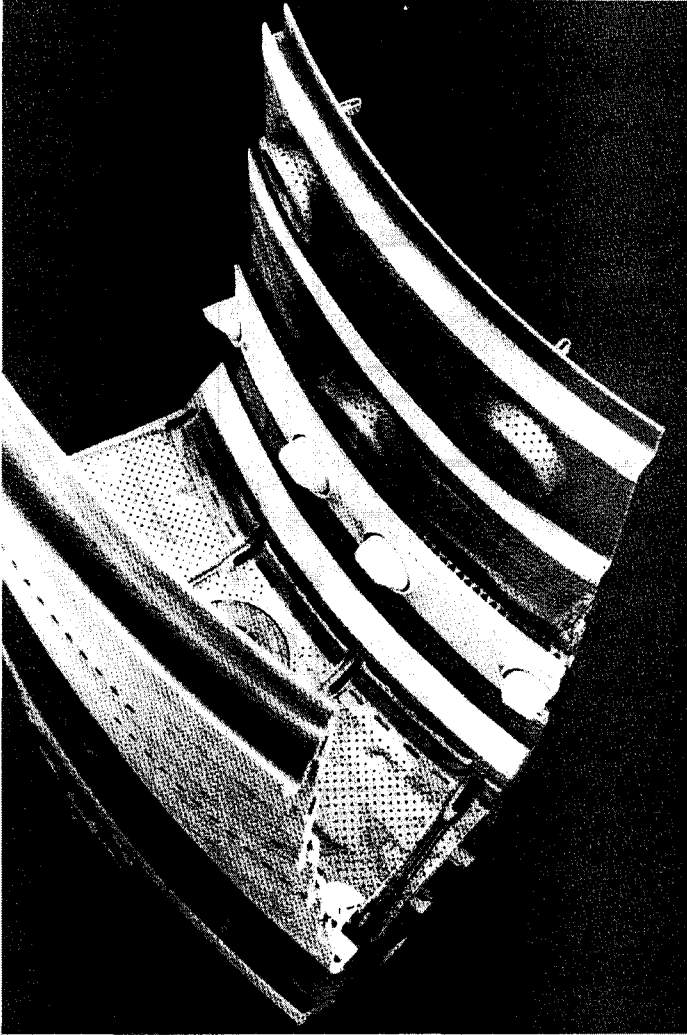
Şekil 5.3. TBC morfolojileri [33]

Her iki kaplama tipinde ortak olan bir nokta az ya da çok geçirgen olmalarıdır ve sıcak gazların zemin yüzeyine sızmasına izin vermeleridir. Ortak bir diğer özellikleri de her iki kaplamanın da doğrudan zemin üzerine uygulandıklarında yeterli bağ sağlayamamalarıdır. Yapışmanın iyileştirilmesi ve aynı zamanda sızan gazların oksitlenmeye neden olmasını önlemek için, zemin ile seramik tabaka arasına bir bağ kaplama uygulanmalıdır. Bağ kaplamanın kompozisyonu, seramik üst kaplamalardan çok daha değişiktir ve yapılan çalışmalar bağ kaplamalar üzerinde yoğunlaşmıştır. En yaygın bağ kaplama kategorileri; üst yüzey kaplamaları (overlay), difüzyonlu kaplamalar ve son yıllarda geliştirilen ince metalik tabakalardır [33].

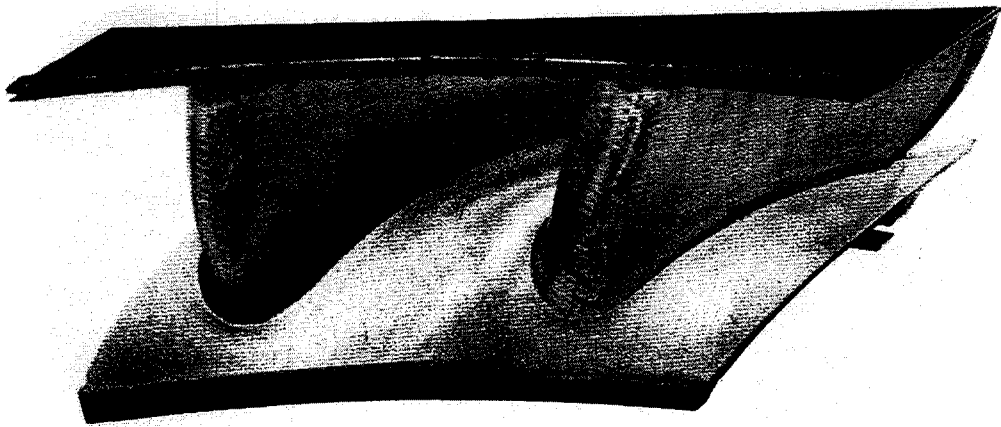
Termal bariyer kaplamalar soğutulmuş metal yüzeyine olan ısı akışını azaltarak daha yüksek türbin giriş sıcaklıklarına izin verir. Bu sayede motor verimi artar ve yakıt tüketimi azalır. Metalik komponentler için soğutma havası gereksinimi azalacağından tasarımlar basitleşir. Ayrıca bu kaplamalar motor rejimindeki ani değişikliklerden kaynaklanan anlık sıcaklıkları dengeleyerek ısıl gerilmeleri azaltır ve böylece komponent ömrünü artırır.

Havacılıkta kullanılan gaz türbinli motorlardaki tipik TBC uygulamaları yanma odaları, art yanma boruları, yakıt buharlaştırıcıları, nozul kılavuz kanatçık platformları gibi statik komponentler ve hava profilleridir (airfoil). Bunlara bir örnek olarak Pratt & Whitney Aircraft 265 kaplama sistemi verilebilir. Bu sistem pale ve kanatçıklardan daha çok yanma odası ve diğer türbin komponentlerinde kullanılmaktadır. Bu kaplama NiCoCrAlY bağ kaplama ve itriyum dengeli zirkon oksit ($93 \text{ ZrO}_2\text{-}7 \text{ Y}_2\text{O}_3$) üst kaplamadan oluşur. $250 \mu\text{m}$ 'lik zirkon oksidin, hava soğutmalı gelişmiş bir tasarıma sahip bir türbin palesinin hücum kenarındaki durgun hal sıcaklığını 93°C azalttığı ölçülmüştür. Bir diğer uygulama örneği Rolls-Royce RB212 motorunun yanma odası ve türbin stator kanatçık platformları verilebilir (şekil 5.4 ve 5.5). Yanma odasında magnezyum oksit dengeli zirkon oksitten yapılmış bir dış katman, nikel-krom bağ kaplama ve bu ikisi arasındaki bir seramik/metalik katmandan oluşan üç katlı bir TBC sistemi kullanılmıştır. Toplam kaplama kalınlığı 0.4 mm 'dir. Bu tür bir kaplama 50°C 'nin üzerinde bir yerel sıcaklık düşüşü sağlayarak yanma odasının ömrünü ikiye katlamıştır. Türbin stator kanatçıklarının platformlarında itriyum dengeli zirkon oksit ile MCrAlY

bağ kaplama kullanılmış ve bu sayede film soğutma ihtiyacı ortadan kaldırılarak verim iyileştirilmiştir [26,38]



Şekil 5.4. Rolls-Royce RB212 motorunun yanma odası [38]



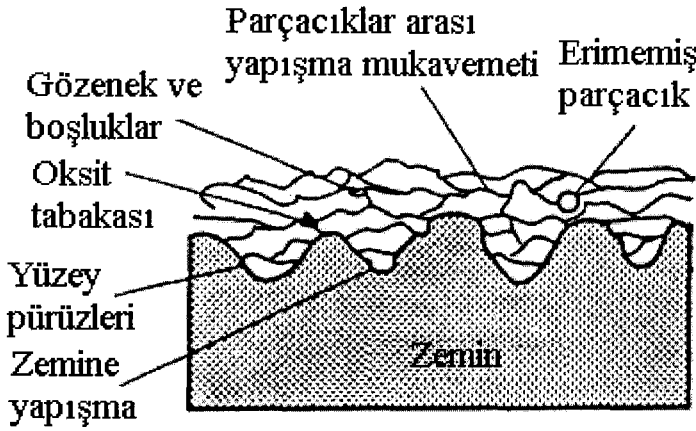
Şekil 5.5 Rolls-Royce RB212 motorunun türbin stator kanatçıkları [38]

5.5. Termal Sprey Kaplamalar

Termal sprej kaplamalar (TSC), orijinal ekipman imalatı ve kullarındaki ekipmanın yenilenmesi için aşınmaya, erozyona, sürtünerek aşınmaya (abrasion) ve korozyona karşı dayanıklı kaplamalar sağlamak için kullanılan yüzey kaplamalarıdır (erozyon, içinde katı parçacıklar bulunan hareketli akışkanların aşındırıcı etkisi ile metallerin ya da diğerk malzemelerin tahrip edilmesidir). Genelde termal sprej kaplamalar metalleri, seramikleri, plastikleri ve polimer kompozitleri içeren geniş bir zemin malzemesi aralığına uygulanabilir [39].

Termal spreyleme (püskürtme), metalik ya da ametalik bir besleme malzemesinin ısıtılarak uygun şekilde hazırlanmış bir zemin üzerine atomize bir şekilde püskürtölmesini içerir. Termal sprej besleme malzemeleri (tel, örlümüş tel, seramik çubuk ve toz) yanma (alev, yüksek hızlı oksijen yakıt ve detonasyon) ve elektrik (ark ve plazma) yöntemleriyle plastik ya da erimiş hallerine gelene kadar ısıtılırlar [39]. Plastik ya da erimiş haldeki malzemeler zemine doğru hızlandırılırlar. Parçacıklar ya da damlalar yüzeye çarparlar, düzleşirler. Önceden hazırlanmış yüzey pürüzleri ve birbirleri ile yapışarak ince plakalar oluşturlar. Püskürtölen parçacıklar zemine çarptıklarında soğurlar ve birbirleri üzerine yığılarak zemin üzerinde yapraklı bir yapıya sahip kaplama oluşturlar. Zemin malzemesindeki metalürjik değışimleri önlemek için genelde zemin sıcaklığı 200°C veya altında tutulabilir [39]. Bu da termal sprej kaplamaların cam, fiber veya plastik gibi metalik olmayan malzemelerde de uygulanabilmesi anlamına gelir.

Termal sprej kaplamaların özellikleri geçirgenlik, parçacıklar arası yapışma (kohezyon), zemine yapışma ve kaplama malzemesinin kimyası gibi özelliklere bağıdır. Parçacıklar zemine mekanik olarak, metalürjik olarak veya kimyasal olarak yapışırlar. Parçacıkların arpma hızı, parçacık boyutu, zeminin yüzey pürüzlölüğü, parçacık sıcaklığı ve zemin sıcaklığı yapışma mukavemetini etkiler. Şekil 5.6'da tipik bir termal sprej kaplama kesitindeki yapraklı yapı, oksit oluşumlar ve erimemiş parçacıklar görölmektedir [39].



Şekil 5.6. TBC'deki tipik yapraklı yapı [39]

Termal sprej kaplamalar gaz türbinli motorların çeşitli komponentlerinde kullanılır. Bunlar sıcaklığın 600°C 'ye çıktığı kompresör, 900°C civarlarındaki yanma odası, pale sıcaklıklarının $900-1000^{\circ}\text{C}$ olduğu yüksek ve alçak basınç türbinleri örnek verilebilir. Bu farklı çevrelerde kaplamaların aşınmaya karşı, korozyona, oksitlenmeye karşı dayanıklı olması istenir, aşınabilir ve ya aşındırıcı olması istenebilir [7].

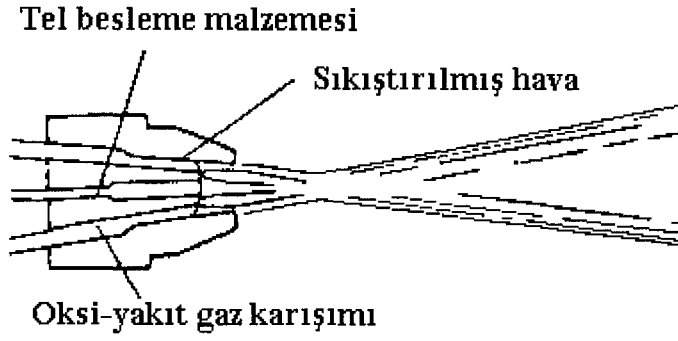
5.5.1. Termal sprej kaplama yöntemleri ve uygulama alanları

Termal sprej kaplama yöntemleri kullanılan besleme malzemelerine, ısıtma yöntemlerine ve malzemenin zemine doğru püskürtülme yöntemlerine göre değişmektedir. Temel besleme malzemeleri toz, tel, örgü tel ve seramik çubuktur. Çizelge 5.4'de görüldüğü gibi termal sprej kaplama yöntemleri ısı oluşumuna göre iki ana grupta incelenir. Çizelge 5.5'de ise bu TSC yöntemlerinin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.4. Isı oluşumu ve besleme malzemelerine göre TSC yöntemlerinin sınıflandırılması [39]

Besleme malzemesi	Termal sprej yöntemleri*					
	Yanma			Elektriki Plazma		
	Alev	HVOF**	Detonasyon	Ark	Doğru akım	İkili indüksiyon
Toz	X	X	X	---	X	X
Tel	X	---	---	X	---	---
Örgülü tel	X	---	---	X	---	---
Seramik çubuk	X	---	---	---	---	---

* X, uygulanabilir. ** Yüksek hızlı oksji-yakıt.



Şekil 5.8. Alevli tel püskürtme yöntemi [39]

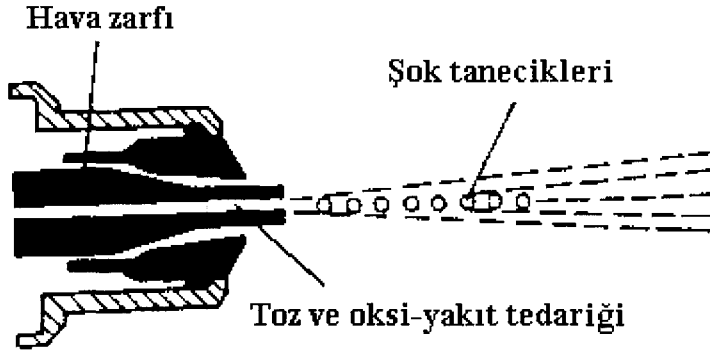
Çok yüksek bir mukavemet/ağırlık oranına sahip olmasına rağmen zayıf aşınma özelliklerine sahip olan titanyuma aşınma direnci veren alev püskürtme örnekleri kompresör pale platformlarını, flanş contaları (flange), veya muylu yüzeyleri ve yatak gövdelerini içerir. Bu uygulamalarda bir tungsten karbit-kobalt kompozit kullanılır. Yanma odası yüzeyleri veya nozul kılavuz kanatçıkları gibi sıcaklığın 500-900°C arasında değiştiği bölgelerde bir krom karbit-nikel krom karışımı kullanılır [7,40].

5.5.1.2. Detonasyonla alev püskürtme

Detonasyonla alev püskürtme yöntemi detonasyon tabancası ve yüksek hızlı oksijen-yakıt tabancası olmak üzere iki ayrı şekilde uygulanır.

Detonasyon tabancası yönteminde oksijen ve yakıt gazlar toz ile karıştırılır ve periyodik olarak bir namluya püskürtülerek ateşlenir. Bir kıvılcım karışımı ateşleyerek süpersonik bir detonasyon dalgası oluşturur. Bu da toz parçacıklarını 2600°C'ye ısıtır ve bunları 900 m/sn'lik bir hızla zemine püskürtür.

Tabanca içine ölçülmüş miktarlarda oksijen, asetilen ve nitrojen içinde asılı toz şeklindeki besleme malzemesinin püskürtüldüğü bir odacık içerir. Bu karışım elektrikli bir kıvılcım tarafından saniyede birkaç kere ateşlenir ve bu, kaplama tozunu namluyu terk edip iş parçasına çarpmadan önce ısıtan yüksek hızlı bir gaz akışı oluşturur. Gaz hızı, alevli toz püskürtme yönteminden 2.5-5 kat daha hızlıdır. Böylece parçacıklar iş parçasına yaklaşık 20 kat daha büyük bir enerjiyle çarparlar ve neredeyse gözenekleri (geçirgenliği) tamamen önlerler [7].



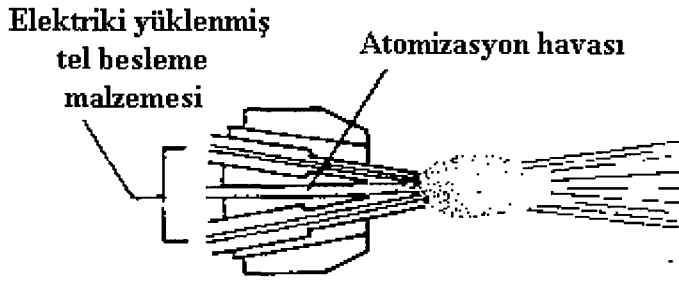
Şekil 5.9. HVOF tabancası [39]

Yüksek hızlı oksi-yakıt (HVOF) tabancası (şekil 5.9) sürekli çalışır ve daha yüksek oksidant ve yakıt gazı basıncı kullanır. Böylece daha yüksek parçacık çarpma hızı sağlayarak son derece yoğun ve iyi bağlanmış bir termal sprej kaplama üretir. HVOF tabancası saatte 2-15 kg toz besleme malzemesi püskürtebilir. HVOF ekipmanı portatiftir yani taşınabilir. Detonasyon tabancası ise sadece sabit atölyelerde kullanılabilir.

Detonasyonla alev püskürtme yöntemi temelde alüminyum oksit, alüminyum oksit-titanyum oksit, krom karbit, tungsten karbit ve tungsten karbit-tungsten krom karbit karışımlarını içeren, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya dayanıklı sert kaplamalar oluşturmak için kullanılır. Kompresör palelerinin destek yüzeyleri veya türbin palelerinin destek yüzeyleri gibi bölgeler, yüksek frekanslı titreşimlerden kaynaklanan aşınmaya maruzdur. Kompresör paleleri genelde titanyum alaşımlarından yapıldıklarından, bir detonasyon tabancası kullanılarak tungsten karbit-kobalt ile kaplanırlar. Nikel alaşımından yapılmış türbin paleleri ise detonasyon tabancası kullanılarak krom karbit-nikrom ile kaplanır [7].

5.5.1.3. Ark sprej

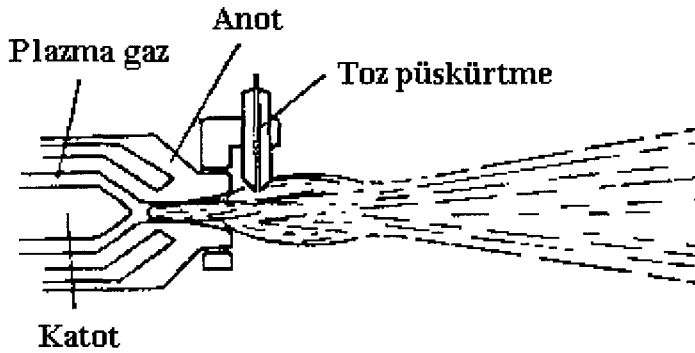
Ark sprej yönteminde iki adet sarf edilebilir tel zıt kutuplarda yüklenerek tabancaya beslenir (şekil 5.10). Lüleden çıktıkları yerde, kesişme noktasında bir ark oluşur ve 5000°C 'de teli eritir. Erimiş metal atomize edilir ve bir hava ya da gaz akımıyla püskürtülerek zemine 240 m/sn hızla çarpar. Metal ve alaşım teller ile metalik kılıf içindeki tozlar (örgü tel) 25 kg/sa'lık oranlarda püskürtülebilir.



Şekil 5.10. Ark sprey yöntemi [39]

5.5.1.4. Plazma sprey

Plazma sprey yönteminde tungstenden yapılmış bir negatif elektrotla pozitif elektrot görevi gören su soğutmalı bir bakır lüle arasında DC ark oluşturulur (şekil 5.11). Argon gibi bir soy gaz ya da indirgeyici gaz basınç altında elektrotlar arasındaki boşluğa girer ve burada 17000°C'ye kadar ısıtılarak lüleden yüksek bir hızla dışarı çıkar. Toz şeklindeki besleme malzemesi sıcak gaz akışı içine püskürtülür ve burada eriyerek zemine 250 m/sn hızla çarpar. Püskürtme oranları 0.1 kg/sa/kW civarındadır. Normal güç kaynakları 15-80 kW arasındadır. Güç çıkışları 200 kW'a kadar yükselen daha yüksek güçlü plazma tabancaları, prensipte seramikleri 25-50 kg/sa, metalleri ise daha yüksek bir oranda püskürtebilirler [39].



Şekil 5.11. Plazma sprey yöntemi [39]

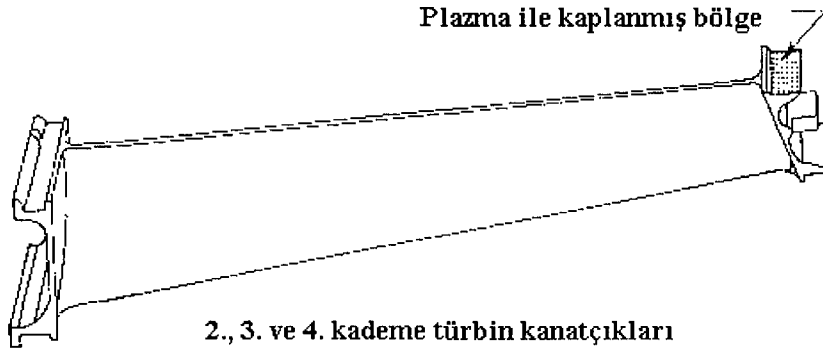
Tropik ya da deniz koşulları altında kanatçıklardan geçen yüksek sıcaklıklı gaz erozyona, korozyona, oksitlenmeye ve ısıl yorulmaya neden olur. Bu yüzden türbin palelerinin profil bölümlerine kobalt, krom, nikel ve alüminyum alaşımlarının bir karışımı şeklinde olabilen kaplamalar plazma sprey yöntemiyle uygulanır [7,40].

Dönen bir asamblenin statik parçaları arasında (kompresör veya türbin disklerindeki pale kökleri ile kök kanalları gibi) oyulma (fretting) aşınması görülür. Oyulmaya karşı dirençli kaplamalar bakır nikel-indiyum veya alüminyum bronz gibi yumuşak malzemelerdir ve plazma sprej yöntemiyle uygulanırlar [7,32].

Yataklar veya statik parçalar gibi motor çevriminin bir neticesi olarak, iki parçanın birbirleri üzerinde hareket ettiği yerlerde ovalamadan kaynaklanan aşınma görülür. Dönen conta (rotating seal) boşlukları ile radyal kompresör ve türbin uç boşluklarında özel bir durum oluşur. Gereksiz büyük boşlukları önlemek için statik parçalara genelde yumuşak aşınabilen kaplamalar, dönen parçalara da aşınmanın rotor balansını bozmasını önlemek için aşındırıcı kaplamalar uygulanır. Plazma sprej yöntemiyle nikel grafit ya da silikon alüminyum ve grafit kaplamalar aşındırılabilir kaplama olarak; detonasyonla püskürtme yöntemiyle de alüminyum oksit aşındırıcı kaplama olarak uygulanır [7].

Bir motorun kompresör ve türbin bölgelerinde maksimum verimin elde edilmesi için, dönen palelerin uçlarında minimum boşluk esastır. Bunun için dış halkalarda pale uçlarının takip ettiği yola, herhangi bir istenmeyen “ovalama” (rub) durumunda palelere zarar vermeden aşınabilecek bir kaplama uygulanır. Kaplama malzemesinin seçimi aşındırılabilirlik derecesine ve motorda farklı çalışma sıcaklıklarında istenen erozyon direncine bağlıdır. Kompresör bölümüne bir silikon alüminyum-polyester karışımı, sıcak türbin parçalarına da nikel alüminid uygulanabilir. Ters işlem de dönen conta (rotating seal) çemberlerine veya kompresör ara halkalarına (spacer), aşındırıcı bir tip kaplamayla uygulanır. Bu durumlarda alev püskürtme yöntemiyle seramik, tercihen statik stator kanatçıklarını aşındırmak için uygulanır. Böylece dönen parçaların balansı bozulmamış olur [7,32].

Şekil 5.12’de Türbin kanatçıklarında plazma sprej yöntemiyle kaplanmış bölgeler görülmektedir.

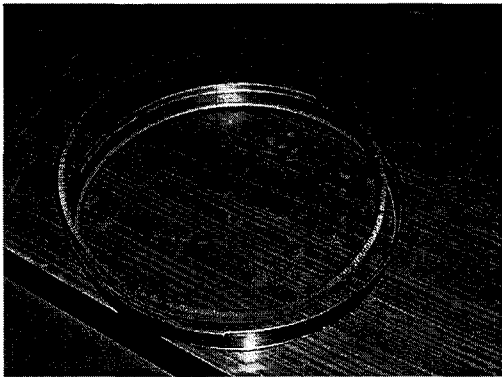


Şekil 5.12. Türbin kanatçıkları üzerindeki plazma kaplanmış bölge [10]

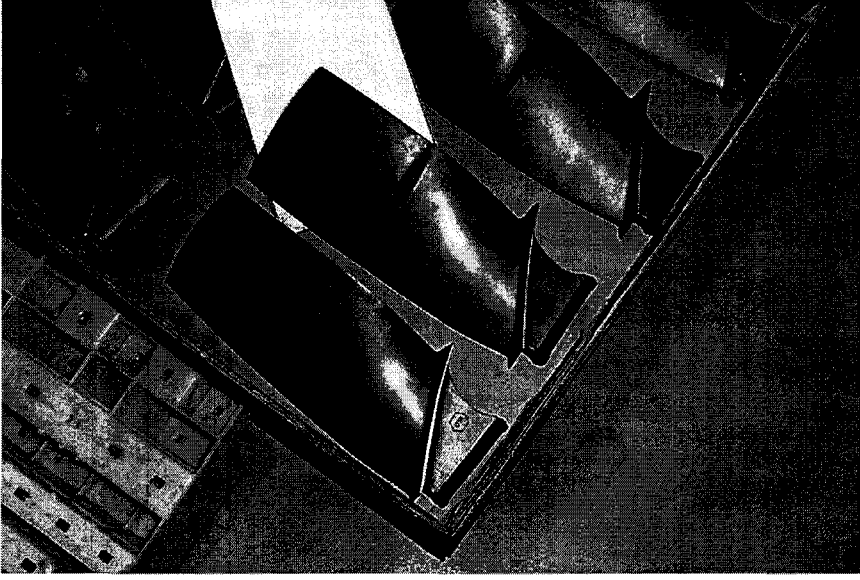
5.6. HİBM’nde F110-GE-100/129 Motoruna Uygulanan Kaplama İşlemleri

HİBM Jet Revizyon Müdürlüğü’nde, yapılan kontroller sonucunda hasarlı oldukları belirlenen F110-GE-100/129 motorlarının komponentlerine plazma sprej ve alev püskürtme yöntemleri kullanılarak bir takım kaplama işlemleri uygulanmaktadır.

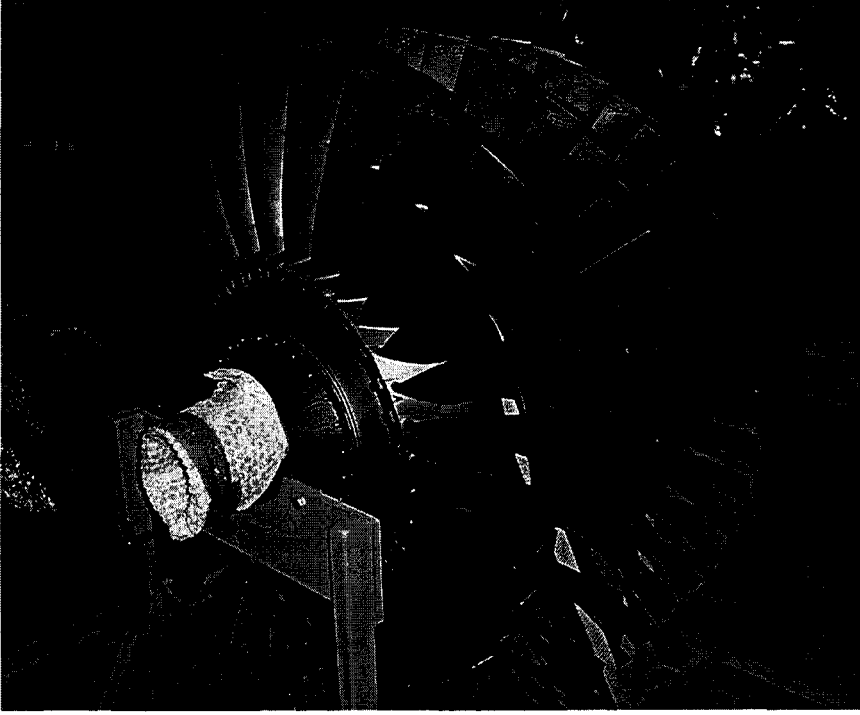
Özellikle motorun sıcak bölüm komponentlerine (yanma odası, türbin ve egzoz) Ni-Cr-Al-Y ve $ZrO_2-Y_2O_3$ termal sprej kaplamalar uygulanmaktadır. Bunun yanında ön çerçeve (front frame), fan, fan paleleri, giriş kılavuz kanatçıkları, kompresör dış gövdesi (compressor case), kompresör ön dış contası (compressor forward outer seal), kompresör arka dönen contası (compressor rear rotating seal) gibi soğuk bölüm komponentlerine elektroliz yoluyla krom, nikel ve gümüş kaplamalar ve metal sprej kaplamalar uygulanmaktadır. Yanma odasının iç ve dış çemberleri (combustion chamber inner and outer liners), alev tutucu (flame holder) ve hareketli egzoz flapları (exhaust divergent flaps) da termal sprej kaplamaların uygulandığı diğer sıcak bölüm komponentlerine örnek gösterilebilir. Aşağıdaki şekillerde bu komponentlerin bazılarına örnekler verilmiştir.



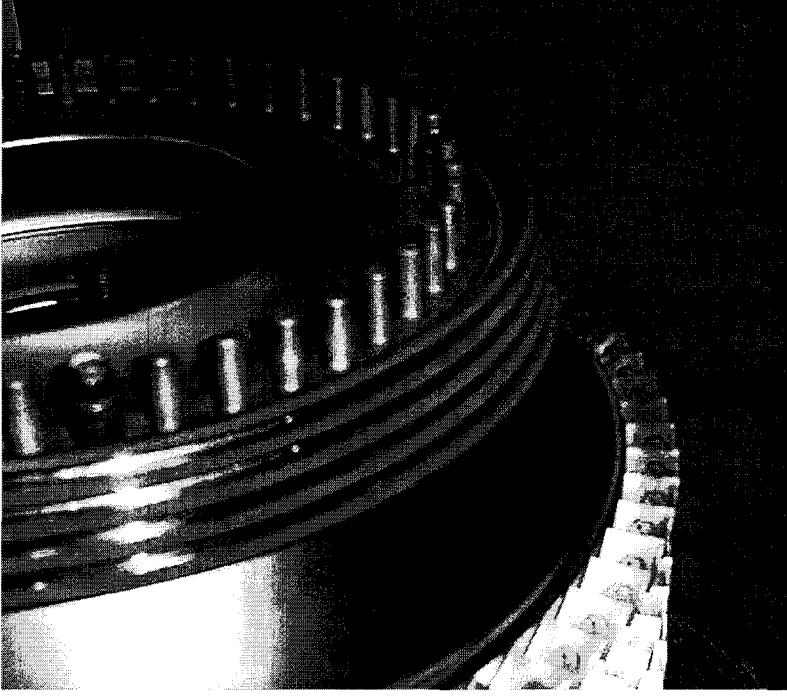
Şekil 5.13. Kaplama işlemi görmüş bir bal peteği conta (honeycomb seal)



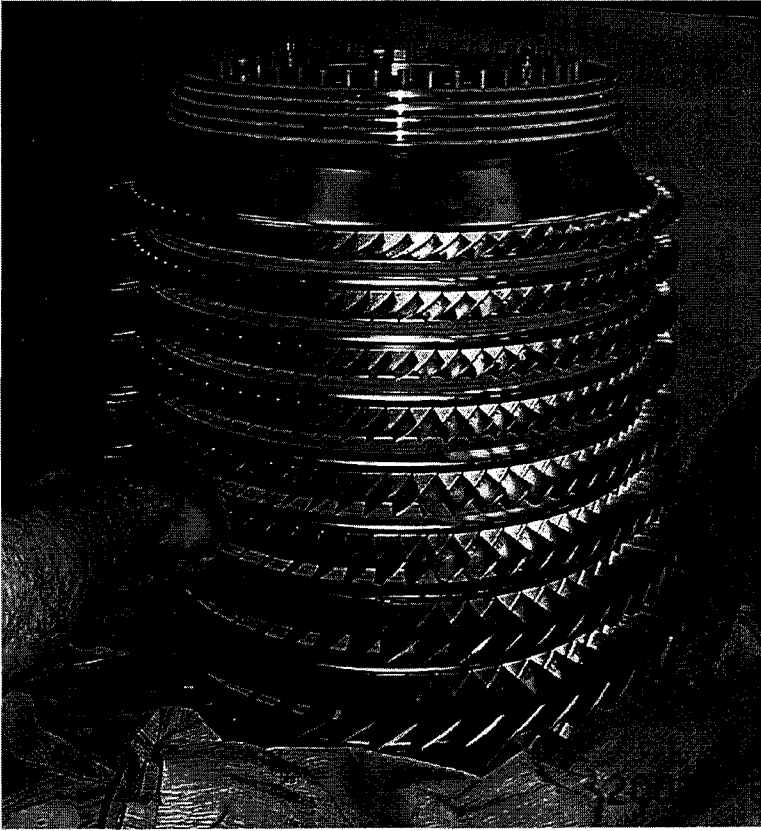
Şekil 5.14. Kaplama işlemi öncesi fan paleleri



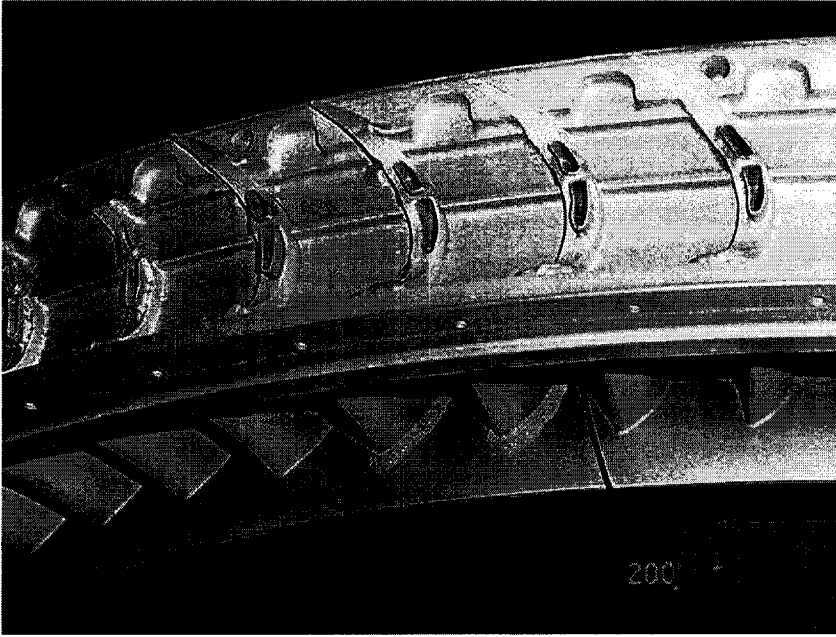
Şekil 5.15. Kaplama işleminden sonra monte edilmiş bir fan



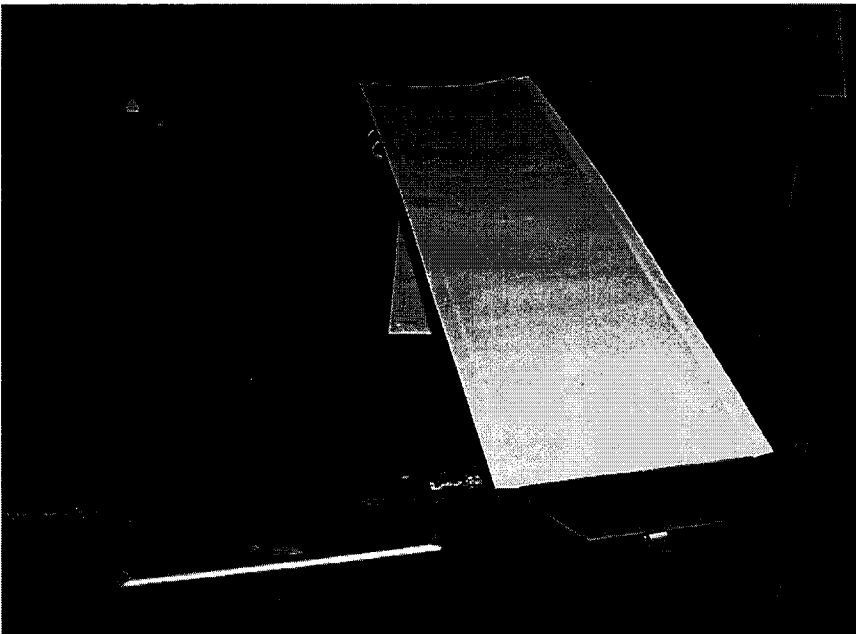
Şekil 5.16. HPC dönen contası (rotating air seal) üzerindeki kaplama



Şekil 5.17. Kaplama işlemi sonrası monte edilmiş bir HPC



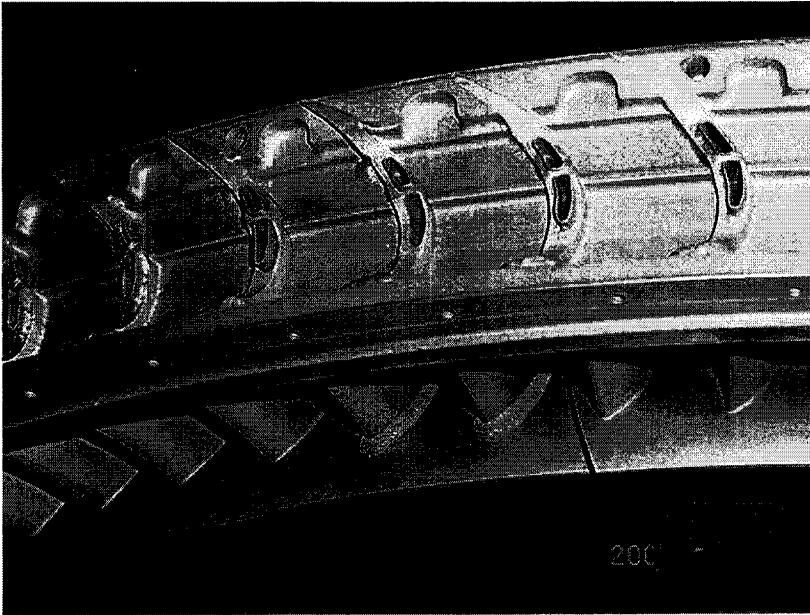
Şekil 5.18. TBC işlemi görmüş bir HPT nozulu



Şekil 5.19. Çıplak (sol) ve TBC ile kaplanmış (sağ) egzoz flapları



Şekil 5.20. Kompresör ön dış conta (forward outer seal) üzerindeki borazon kaplama



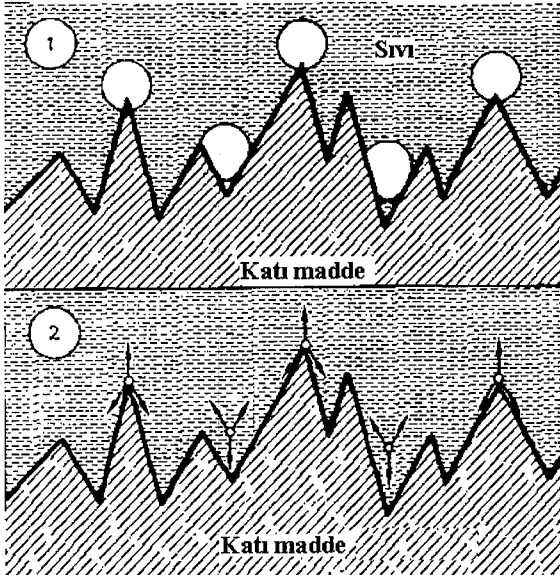
Şekil 5.21. Kaplama işlemi görmüş bir LPT nozulu

6. DİĞER YENİLEME İŞLEMLERİ

Kaynak, sert lehim, işleme ve kaplama jet motorlarında kullanılan temel yenileme işlemleridir. Fakat bu işlemlerin öncesinde veya sonrasında uygulanan ve amacı bu yenileme işlemlerinin uygulanmalarını kolaylaştırmak, verimlerini arttırmak olan bir takım işlemler de mevcuttur. Bunlar temizleme, kumlama, boyama işlemleri ve bir takım ısıtma işlemlerdir. Çalışmanın bu bölümünde bu işlemler kısaca tanıtılmıştır.

6.1. Temizleme

Jet motor komponentlerine tahribatsız muayenelerden ya da kaynak, kaplama, boyama, işleme vb. yenileme işlemleri uygulanmadan önce, komponent üzerindeki olası yağların, kirlerin vb. pisliklerin temizlenmesi gerekir. Temizleme işlemi kimyasal bir çözündürücü içine daldırılarak, çözündürücü buharına tutularak, mekanik yöntemlerle ya da yüksek frekanslı ses dalgaları kullanarak gerçekleştirilebilir. Kimyasal temizleme işlemlerinde trikloretilen, trikloreten, perkloretilen veya sıvı alkalin solüsyonları kullanılır.



Şekil 6.1. Ultrasonik temizlemedeki sıkıştırma (1) ve genişleme (2) kademeleri [7]

Ultrasonik temizlemede bir sıvı içindeki yüksek frekanslı ses dalgalarının oluşturduğu sıkıştırma ve genişleme etkisi kullanılır (şekil 6.1). Bu sıkıştırma ve genişleme hareketi periyodik olursa bu dalga bir sinüs dalgası şeklini alır. 20 kHz ‘den [7] daha yüksek frekansa sahip ses dalgaları insan kulağı tarafından

işitilemez, fakat işitilebilir ses dalgalarından çok daha büyük enerjilerle üretilebilirler. Ultrasonik temizleme esnasında yüksek enerjiler kullanılır ve çok küçük kavite baloncukları oluşur. Sıkıştırma safhasında bu baloncuklar patlar ve enerji yayarlar. Bu enerji de birkaç mikrosaniye içinde çok güçlü bir mekanik kuvvet üretir. Bu etkinin gerçekleşmesi için temizlenecek komponentler, ultrasonik titreşimleri iletecek ve kimyasal etkiye yardımcı olacak bir sıvı içine yerleştirilmelidir. Metallerin temizlenmesi için 20 kHz civarlarındaki bir frekans idealdir ve bu frekansta kavite baloncuklarının ortalama çapı 0.1 mm civarındadır [7].

6.2. Kumlama ve Bilye ile Dövme

Bu temizleme yöntemleri bazı koruyucu boya ve kaplamaları kaldıramaz. Bunların bir takım mekanik yöntemlerle kaldırılmaları gerekir. Kumlama esasen, bir metal yüzeye mekanik veya pnömatik yollarla aşındırıcı taneciklerin püskürtülmesi işlemidir. Bu tanecikler alüminyum oksit, cam tozu, silikon, ceviz kabuğu gibi aşındırıcı maddelerdir. Bilye ile dövme işlemi (shot peening) prensipte kumlama işlemine benzer. Farklı olarak, dövülmesi istenen malzemeye göre daha sert ve genelde küre şeklindeki demir, çelik, seramik gibi malzemelerden yapılmış bilyeler dövülecek malzeme üzerine batabilecek şekilde yüksek bir hızla püskürtülür. Bilye ile dövmede amaç malzeme yüzeyini temizlemekten çok, çeşitli yenileme işlemlerine maruz kalmış parçaların üzerindeki mekanik gerilmelerin giderilmesi ve yüzeyin fiziksel özelliklerinin (yüzey kalitesini yükseltmek, gözenekleri gidermek vb.) iyileştirilmesi için kullanılır. Ayrıca tanecikler yüzey üzerinde çok ince ve düzgün dağılmış bir gerilme bölgesi oluşturarak malzemenin mukavemetini attırır, sertleştirir ve ömrünü uzatır.

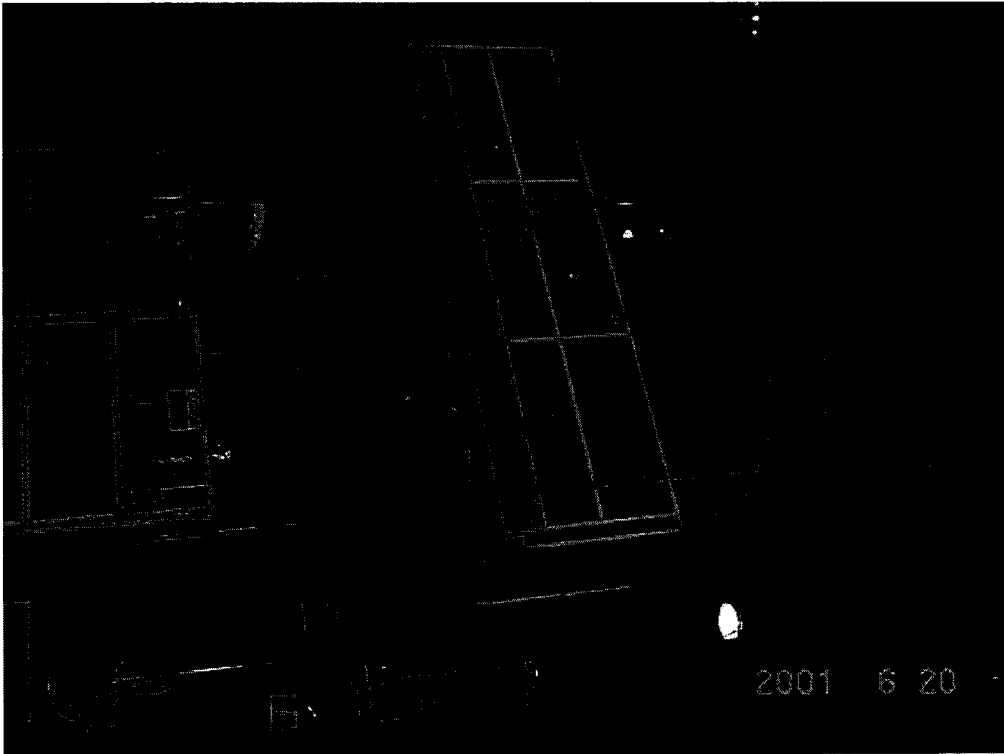
6.3. Boyama

Motorun dahili parçaları ve soğuk kısım komponentlerinde (hava giriş lülesi vb.) malzemeyi aşınmaya karşı koruyucu ve aerodinamik özelliklerini iyileştirici boyalar uygulanır. Gri, siyah veya alüminyum emaye veya epoksi boyalar sıklıkla kullanılır.

6.4. Isıl İşlem

Isıl işlem, katı bir metal ya da alaşımın mukavemetini arttırmak veya yeniden kazandırmak için o metali ya da alaşımı belirli bir hızda, belirli bir sıcaklığa ısıtarak tekrar belirli bir hızda soğutma işlemidir. Çeşitli tipte ısıt işlemler bulunmakla birlikte parça yenileme işlemlerinde en çok kullanılanı tavlama (annealing) işlemidir. Tavlama işleminde parça ısıtılarak kritik sıcaklığın altındaki uygun bir sıcaklıkta tutulur. Daha sonra uygun bir hızla soğutulur. Böylece parçanın işlenebilme yeteneği artar, istenen mikro yapıya ulaşır, belirli mekanik ve fiziksel özelliklere kavuşur. Gerilmelerin giderilmesinde tavlama işlemi; kaynak, sert lehim, işleme ve kumlama işlemleri sonrasında parça üzerinde biriken gerilmeleri alır.

Ulaşılabacak en yüksek sıcaklık, sıcaklığın yükseliş hızı ve soğutma hızının hassas bir şekilde kontrol edilmesi ve kimyasal atmosfer tipi gibi faktörler, kaynak ya da sert lehim gibi yenileme işlemleri sonrasında metal parçaların fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinin tekrar kazandırılması için esastır. Şekil 6.2’de atmosfer kontrollü bir ısıt işlem fırınının görülmektedir.



Şekil 6.2. Atmosfer kontrollü bir ısıt işlem fırını

7. SONUÇ

Daha uzun komponent ömrü, komponentlerin uçak üzerinde bakım yapılmaksızın daha uzun süre kullanılması, daha düşük yakıt maliyetleri ve daha düşük onarım ve yedek parça maliyetleri bir gaz türbini kullanıcısının temel istekleridir. Jet motorları oldukça yüksek basınç ve sıcaklıklarda son derece güç şartlarda çalışmaktadırlar. Çalışma esnasında parçalar kopabilir, servis limitlerinin altında aşınabilir ya da parçalarda çatlaklar oluşabilir. Parça yenileme işlemleri esnasında bu parçalar eski yapılarına ve boyutlarına tekrar geri getirilerek işlevlerini emniyetli bir şekilde yerine getirmeleri sağlar.

Bu bölümde, çalışma içinde ele alınan yenileme işlemlerinin avantaj ve dezavantajlarının yanı sıra, kullanım ömrünü dolduran motor komponentlerinin yenisi ile değiştirilmesi yerine gelişmiş teknolojilerle yenilenerek tekrar kullanılması sonucunda elde edilen kazanımlara ait bazı örneklerin değerlendirilmesi yapılarak ortaya çıkan sonuçlar verilmiştir.

A. Yenileme İşlemlerinin Avantaj ve Dezavantajları

1. Kaynak ve sert lehim yöntemleri

İki parçanın tekrar birleştirilmesi, aşınmış bölgelerin orijinal boyutlarına getirilmesi vb. işlemlerde kaynak ve sert lehim yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada gaz kaynağı tekniklerinden oksiasetilen kaynağı, ark kaynağı tekniklerinden gaz-tungsten ark kaynağı, gaz-metal ark kaynağı, koruyuculu metal ark kaynağı ve plazma ark kaynağı, ışın kaynağı tekniklerinden de elektron ışın kaynağı ve lazer ışın kaynağı incelenmiştir.

Oksiasetilen gaz kaynağı basit, oldukça portatif ve pahalı ekipman gerektirmeyen bir yöntemdir. Oksiasetilen kaynağında enerji kaynağı sınırlı olduğundan kaynak yavaştır ve kaynağın doğrusal uzunluğu başına düşen toplam ısı girdisi yüksektir. Yöntemin özellikleri kaynağı koruyan maske miktarını sınırlar. Bu yüzden titanyum gibi daha reaktif metallerin kaynağı genelde imkansızdır. Jet motorlarının yapısal elemanlarında kullanılmaz. Braket vb. küçük dahili parçaların tamirinde kullanılabilir.

Özet olarak gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) metodu doğal düşük ısı girişinden dolayı ince kısımların kaynağı için elverişlidir. Diğer kaynak yöntemlerinin birçoğuna göre zemin tarafından kaynak dolgu seyreltilmesinin (çözülmemiş zemin ile dolgu malzemesinin birbirine karışması) daha iyi kontrol edilmesini sağlar ve çok temiz bir yöntemdir. En büyük sınırlayıcı düşük dolgu hızıdır. Fakat dolgu telinin elektrik devresi içine elektrottan daha düşük bir potansiyelde alınarak elektrikle ısıtılmasıyla bu sorun çözülebilmektedir. GMAW metodu esneklik ve çok yönlülük sağlar; kolayca otomatik hale getirilebilir. SMAW yöntemine göre daha az ustalık gerektirir ve yüksek birikim oranına (saatte 5-20 kg) ve verime (%90) sahiptir. Yöntemin en büyük kusuru tipik olarak ihtiyaç duyulan güç kaynaklarının (bunlar sabit voltajlı güç kaynaklarıdır) pahalı olmasıdır.

Koruyuculu metal ark kaynağı (SMAW) yönteminin avantajları basit olması, portatif olması, pahalı olmayan ekipman (güç kaynağı, elektrot tutucu ve kablolar) gerektirmesidir. Yöntem çok yönlüdür. Fabrikasyon, montaj, tamir ya da bakım esnasında birleştirme, orijinal boyutlara getirme veya aşınma direncinin arttırılması işlemlerinde kullanılabilir. Yöntemin kusurları ise sınırlı koruma sağlaması ve sınırlı birikim hızlarına sahip olmasıdır. Otomatik yerine manuel teknikler tercih edilir. SMAW'da en iyi sonuçları almak için vasat bir operatör yeteneği yeterlidir.

Gaz türbinli motorlarında kullanılan komponentlerin daha yüksek mukavemetli süper alaşımlarla imal edilmeleri ve buna bağlı olarak daha sağlam, oksitlenmeye karşı daha dirençli kaynak dolgu alaşımlarına olan ihtiyaç kaynak tamirlerinin yapılmasını müthiş derecede zorlaştırmıştır. Bunun sonucu olarak bir çok kompresör ve türbin komponentini kaynak yapma yeteneğine sahip plazma sistemleri geliştirilmiştir.

Plazma ark kaynağında kaynak şalumasının nozulundaki bir delikteki soy gazın toplayıcı etkisi arkı daraltır ve bu sayede GTAW yöntemine göre bir çok avantajlar sağlar. Bunlara örnek olarak; iş parçasındaki çarpılma ve ısıdan etkilenmiş bölgenin en aza indirilmesi, kalın kesitlerin kaynağını mümkün kılması, yüksek kaynak hızlarına ulaşılması, penetrasyonun daha iyi kontrol edilebilmesi ve daha temiz kaynaklar üretebilmesi verilebilir.

Plazma ark kaynağının en büyük dezavantajı gerekli ekipmandır. Güç kaynakları, gaz kontrolörleri ve şalumalar çok karmaşıktır ve şalumalar el ile çalışma esnasında tutulması zor olacak kadar büyüktür. Bu yüzden plazma ark kaynağı genelde otomatik makinelerle gerçekleştirilir. Ayrıca en küçük geleneksel plazma şalumalarıyla bile üretilen ısı dar kenarların ve ince zeminlerin erimesine ve burulmasına neden olduğundan 2.5 mm'den daha dar zeminlere uygulanamaz. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için Metbond® olarak bilinen patentli bir mikro plazma toz kaynağı (MPPW) yöntemi geliştirilmiştir.

GTAW, GMAW, tel dolgulu PAW ve PTA gibi geleneksel yöntemler, paslanmaz çelik veya katı solüsyonla serleştirilmiş nikel ve kobalt alaşımlarından imal edilmiş sabit gaz türbini komponentlerinde kullanılırlar. Çünkü bu alaşımlar oldukça iyi bir kaynak yapılabilme özelliğine sahiptirler. Hareketli türbin komponentlerinde kullanılan daha yüksek mukavemete sahip, çökeltiyle sertleştirilmiş nikel ve demir-nikel bazlı süper alaşımların kaynak yapılabilme özellikleri çok daha düşüktür ve bu tür malzemelerin kaynağı ancak MPPW gibi gelişmiş yöntemlerle mümkündür. Tamamen otomatik plazma ark kaynak sistemleri yüksek basınç türbini palelerinin uçlarının restore edilmesinde ve yeni ya da aşınmış palelerin temas yüzeylerinin satıhça sertleştirilmesinde kullanılmaktadır. Kompresör paleleri ve kanatçıkları bu ileri teknoloji kullanılarak rutin olarak restore edilmekte ve manuel kaynak teknikleriyle ulaşılamayacak yüksek verime ve kaliteye ulaşılmaktadır.

EBW diğer kaynak yöntemlere göre; kaynak esnasında burulma ve büzülmeyi en aza indirme, bir çok sertleştirilmiş metali mekanik özelliklerini bozmadan kaynak yapabilme, ısıya hassas komponentleri kaynak yapabilme gibi bir takım avantajlara sahiptir.

Bu avantajlarının yanında EBW'i sınırlayan bir takım etkenler vardır. EBW' de kullanılan ekipmanların maliyeti genelde konvansiyonel kaynak yöntemlerinde kullanılan ekipmanların maliyetinden daha yüksektir. Mevcut vakum odası kapasitesi ve buna bağlı olarak iş parçası boyutları ve kaynak hızı sınırlıdır. Bu sayılan avantaj ve dezavantajların çoğu genelde tüm EBW'in tüm yöntemleri için geçerli olmakla birlikte bazıları vakumsuz EBW için geçerli değildir. Vakumsuz EBW çok temiz ortam avantajına sahip değildir. Bunun için

helyum ya da argon gibi bir soy gaz korumasına ihtiyaç duyulur. Ulaşılabilecek maksimum kaynak penetrasyonu sınırlıdır. Bununla birlikte yüksek kaynak hızlarına sahiptir ve vakumdan kaynaklanan dezavantajlar bertaraf edilmiştir. Elektron ışınlarının üretilmesinde kullanılan yüksek voltaj, ışının kendisi ve ışının iş parçasına ya da diğer maddelere çarpmasıyla oluşan x ışınları operatörler için potansiyel bir tehlikedir.

Geleneksel kaynak yöntemlerine nazaran bir çok avantaja sahip EBW yönteminin yenileme işlemlerinde kullanımı geçmişte sınırlı tutulmuştur. Fakat otomatik tel besleme sistemlerine sahip EBW ekipmanlarının üretilmesi EBW'nin bir onarım yöntemi olarak kullanımını yaygınlaştırmıştır. Kontrol edilmiş kaynak atmosferinin mevcudiyeti özellikle titanyum gibi reaktif malzemelerin kaynağında elektron ışın yöntemi için belirgin bir avantajdır.

Lazer ışın kaynağının temel avantajları arasında yüksek bir enerji yoğunluğu sağlaması, oda atmosferinde kullanılabilmesi, dar kaynakların yapılabilmesi, çok düşük bir ısıdan etkilenmiş bölge ve iş parçasında minimum burulma oluşturması yer almaktadır.

Bu avantajlarının yanında lazer kaynağının bir takım dezavantajları da vardır. Birleştirilecek parçaların birbiriyle hassas bir şekilde hizalanmaları sıradan ark kaynağı yöntemlerine göre daha kritiktir. Bir lazer ışını için tipik odak noktası çapı 100-1000 μm arasında değişmektedir. Buna ilaveten lazer kaynağı ekipmanlarının maliyeti karşılaştırılabilir ark kaynağı sistemlerinkinden neredeyse 10 kat daha pahalıdır. Ayrıca lazer kaynağı ile ulaşılabilen kaynak penetrasyonu elektron ışın kaynağına nazaran daha azdır.

İncelenen füzyonlu kaynak yöntemleri içinde enerji verimi en yüksek olan yöntem lazer ışın kaynağıdır. Lazer ışın kaynağıyla ancak elektron ışın kaynağı ile ulaşılacak kalite ve hassasiyette birleşmeler yapılabilmektedir. Fakat her iki yöntemin de birbirlerine göre bir takım avantaj ve dezavantajları vardır. Örneğin EBW ile tüm malzemelerde derin bir penetrasyon elde edilirken lazer kaynağında ışını yansıtan malzemelerde bu mümkün olmamaktadır. EBW'de elektronların engelsiz bir şekilde hareket etmesi için vakum ortamı gerekirken LBW vakumsuz ortamlarda da çalışabilir. EBW elektrikli olarak çok

verimli iken (yaklaşık %99), LW verimsizdir (yaklaşık %12). Ayrıca EBW tehlikeli x ışınları üretirken LBW’de böyle bir durum söz konusu değildir.

Çalışmada ayrıca endüstriyel öneme sahip ve güncel sert lehim yöntemleri incelenmiştir. Bunlar; şaluma lehim, fırın lehim, indüksiyon lehim, direnç (rezistans) lehim, daldırma lehim, kızılötesi lehim ve difüzyon lehimidir. Yapılan incelemelerde difüzyon lehiminin diğer sert lehim yöntemlerine göre üstünlükleri sayesinde parça yenileme işlemlerinde en çok kullanılan lehim yöntemi olduğu tespit edilmiştir.

2. Gelişmiş işleme yöntemleri

Kaynak ve sert lehimden sonra yenileme işlemi olarak gelişmiş işleme yöntemleri incelenmiştir. Gelişmiş yöntemlerde metal, elektrik enerjisinin iş parçasına doğrudan uygulanmasıyla kaldırılır. Bu yöntemler; elektrokimyasal işleme (ECM), elektriki aşındırmayla işleme (EDM), elektrokimyasal taşlama (ECG) ve lazer ışınıyla işleme (LBM)’dir.

Elektrokimyasal işleme (ECM) ile kazanılan başlıca avantajlar; metal işleme hızının metalin sertliğinden bağımsız olması, takımlarda aşınma olmaması, diğer işleme yöntemlerine göre daha hassas olması, birikmiş gerilme ve termal gerilmeye neden olmamasıdır.

Bu avantajların yanında ECM’in birtakım dezavantajları da vardır. Özetle; ECM makineleri, kurulması, bakımı ve takımları pahalıdır. Ayrıca elektrolitin çevreye zarar vermeyecek bir şekilde depolanması gerekir.

Elektrokimyasal işlemenin yenileme işlemlerinde en yaygın kullanım alanı çapak alma ve delik delme işlemleridir.

Elektriki aşındırmayla işlemenin (EDM) başlıca avantajları; iletken olmak kaydıyla sertliklerine bakılmaksızın tüm metallerin ve alaşımların işlenebilmesi, oldukça hassas olması, ince kesitlerin işlenebilmesi, çapaksız ve pürüzsüz bir yüzey oluşturması şeklinde özetlenebilir.

Bu avantajların yanında EDM’in; takım aşınmasından dolayı maliyetlerin yüksek olması ve yavaş bir yöntem olması gibi birtakım dezavantajları da vardır. EDM, parça yenileme işlemlerinde genelde delik delme ve karmaşık kesitlerin çürütülmesinde kullanılır.

Elektrokimyasal taşlama (ECG); iş parçasının sertliğinden bağımsız olma, işlenmesi güç sert malzemelerde yüksek bir metal kaldırma oranı sağlama, uzun disk ömrü, çapak ve gerilmeye neden olmama, ince çeperli ve ısıya hassas malzemelere uygunluk gibi avantajlara sahiptir.

Bu avantajların yanında ECG'in birtakım dezavantajları da vardır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir: Köşelerin içleri taşlanırken elektrik alan etkilerinden dolayı hassasiyet kaybolmaktadır. 0.25-0.375 mm'den daha iyi yarıçaplar nadiren elde edilir.

Geleneksel taşlama işlemleriyle işlenemeyecek kadar sert alaşımlardan yapılmış motor komponentlerinde, özellikle dairevi bir şekle sahip olanlarda ECG yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak dönen bal peteği contaların (rotating honeycomb seal) çürütülmesi, nozul kanatçıklarının çürütülmesi ve borazon gibi sert kaplamaların uygulandığı contalardan (air seal) bu kaplamaların kaldırılması verilebilir.

Gaz türbinli motor komponentleri ve nozul rehber kanatçıkları gibi 1m^3 - 100mm^3 arasında değişen boyutlara sahip komponentler üzerinde 8 mm'ye kadar varan uzunluklarda ve 10/1'lik bir derinlik/çap oranına sahip delikler Nd-YAG lazer ile EDM'den %20-30 daha düşük maliyetlerle üretilmektedir.

3. Koruyucu kaplamalar

Gaz türbinli motorlar daha yüksek çalışma sıcaklıklarında daha iyi güç çıkışı ve verim vermektedirler. Türbin pale malzemesi olarak kullanılan süper alaşımlar sadece 1000°C 'ye kadar olan çalışma sıcaklıklarında makul bir kullanım ömrüne sahiptirler. Oysa gelişmiş itki sistemlerinde türbin giriş sıcaklıkları 1700°C 'ye kadar yükselebilir ve metalik yapıların 1200°C gibi yüksek sıcaklıklara dayanmaları beklenir. Şu anda kullanımda olan hiçbir rotor ya da stator kanatçığı kaplanmadığı müddetçe bu yüksek derecede korozyon ve yüksek sıcaklıklı ortamda uzun ömürlü olamaz. Bu nedenle zemin malzemesini korumak ve pale, kanatçık gibi komponentlerin istenen performansı ve tasarlanan ömürlerini garantilemek için yüzey kaplamalarının kullanılması gerekmektedir.

Kompresör profillerinde rastlanan en yaygın kirlenme korozyondur. Korozyonu, dolayısıyla kompresör profillerinin kirlenmesini önlemek için

korozyona ve erozyona dayanıklı, pürüzsüz kaplamalar uygulamak iyi bir yöntemdir. Yenileme işleminin sonunda bu kaplamalar, komponentlerin orijinal imalatındakine benzer teknoloji ve ekipman kullanılarak tekrar yapılmalıdır. Codep gibi geleneksel alüminid yöntemler ve elektroliz yoluyla kaplamalar yerini çok daha pahalı alüminidlere, kimyasal buhar birikimi (CVD), alçak basınçlı plazma sprej (LPPS), yüksek hızlı oksji-yakıt sprej (HVOF) ve elektron ışınıyla fiziksel buhar birikimi (EB-PVD) teknolojileri tarafından uygulanan MCrAlY ve termal bariyer kaplamalara (TBC) bırakmıştır. Bu teknolojilere birçok onarım istasyonu sahip değildir. Bu kaplama ekipmanının ve teknoloji lisanslarının mevcudiyeti, gelişmiş motorların sıcak bölümlerine yenileme işlemi uygulama yeteneğine sahip onarım istasyonlarının sayısını sınırlamaktadır.

Çalışmada difüzyonlu kaplamalar, MCrAlY üst yüzey kaplamaları, metalik-seramik kaplamalar, termal bariyer kaplamalar ve termal sprej kaplamalar incelenmiştir. Tüm bu kaplamaların amacı soğuk bölüm elemanlarında hava akışını düzeltmek amacıyla pürüzsüz bir yüzey oluşturmak, sıcak bölüm elemanlarında ise sıcak gazların olumsuz etkilerinden komponentleri korumaktır.

En yüksek alev sıcaklığına ark ve plazma yöntemleri ile ulaşılırken en yüksek parçacık çarpma hızı ise HVOF ve detonasyon tabancası ile elde edilmektedir. En yüksek püskürtme oranı ise HVOF ile elde edilmektedir.

B. Parça Yenileme İşlemleri Sonucunda Elde Edilen Kazanımlara Örnekler

1) Büyük bir Amerikan havayolu, filosundaki JT8D motorlarının yüksek basınç kompresör statorlarında SermeTel kaplamalar ile geleneksel Akımsız Nikel (EN) kaplamaların korozyona karşı koruma yeteneğini karşılaştırmak üzere bir program yürütmüştür. Havayolu her iki kaplama için birer statoru 4 yıl boyunca 11000 saatten fazla kullanmıştır. Motor sökölüp, yıkandıktan sonra EN kaplı statorda kanatçık ve dış çember (shroud) bölgelerinde kırmızı pas oluşumuna rastlanmış ve statorun motora doğrudan takılması uygun görülmemiştir. SermeTel kaplı statorda hiçbir korozyon belirtisine rastlanmamış ve basit birkaç işlem sonrası tekrar motora takılmıştır [41].

2) Amerika'daki büyük havayollarından birisi, SermeTel 5380DP ile kaplanmış CF6-50 motorunun yüksek basınç kompresörü profillerinin daha uzun

bir süre pürüzsüzlüğünü koruduğunu, daha düşük bir hızla kirlendiğini ve daha kolay temizlendiğini bildirmiştir. Kaplama uygulanan ilk motor 2517 çevrim sonrasında servisten alınmıştır. Bu, olağan motor ömründen %50 fazladır. Rotorun temiz olduğu görülmüş ve ilk 3 kademedeki sınırlı kirlenme deterjan ve su ile kolayca temizlenmiştir. O anki yargı motorun daha uzun bir süre kullanılabileceği yönündedir. Fakat başka nedenlerden dolayı motor servisten alınmıştır [41].

3) PT-6A-27 motorunda 1000 °C kadar yüksek sıcaklıklara maruz türbin komponentleri gelişmiş bir alüminid difüzyonlu kaplama tekniği olan SermaLoy J'nin uygulanmasıyla 9700 saat serviste kalmıştır. Komponentler 1988'de kaplanmış ve her 3 yılda bir kontrol edilmiştir. Sürekli iyi bir durumda oldukları görülmüştür. En son yapılan kontrolde orijinal kaplamanın çoğunun bozulmamış olduğu ve halen korozyona karşı iyi bir koruma sağladığı görülmüştür [41].

4) ABD'nin güney doğusunda çalışan bir amfibi uçak servisi Mollard tipi uçaklarında kullanılan PT-6A-34 motorlarının kanatçık halkalarında (vane ring) geleneksel alüminid kaplamalar kullanılmaktadır. Komponentlerin ortalama ömrü 600 saattir. Parçaların her 400-600 saate kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu da kanatçık halkalarının sökülerek atıldığı saate denk gelmektedir. Her kontrol ve revizyonun maliyeti 15000-20000 \$ arasındadır. Daha sonra işletme, parça üzerinde SermaLoy J'yi kullanmaya başlamış ve ortalama donanım ömrü 2000 saate uzamıştır. Ayrıca işletme bakımlar arasındaki süreye 1000 saate uzatmıştır ve kaplanmış parçanın bakım esnasındaki durumu, parçanın onarılarak tekrar kullanılmasını mümkün kılmıştır [41].

5) Eskişehir 1. Hava İkmal Bakım Merkezi Jet Revizyon Müdürlüğü'nde F-16 savaş uçaklarında kullanılan F110-GE-100/129 turbofan motorlarının fabrika seviyesi bakımları yapılmaktadır. Bu motorların her 3000 TAC sonunda fabrika seviyesi bakıma alınmaları gerekmektedir. Yurt dışında 3000 TAC bakımı yaklaşık 125000 \$, 6000 TAC bakımı ise yaklaşık 500000 \$ tutmaktadır. HİBM'nde ise bu bakımlar yaklaşık %50 daha ucuza yapılabilmektedir. Hava Kuvvetleri envanterindeki F-16 uçaklarının sayısı göz önünde bulundurulduğunda, bu bakımların yurt içinde yapılması sayesinde yıllık kazanç milyon dolarları bulmaktadır.

6) Bakımlar esnasında motor komponentlerine bir takım kontroller uygulanmaktadır. Çalışmanın başında da belirtildiği üzere bu kontroller sonucunda görevini emniyetli bir şekilde yerine getiremeyecek şekilde hasarlanmış komponentler ya yenisi ile değiştirilir ya da üretici firmanın onayladığı tekniklerle yenileştirilir. Örneğin F110-GE-100/129 motorunun 1. kademe fan diskinin 3000 TAC'da kontrol edilmesi ve 6000 TAC'da durumu ne olursa olsun değiştirilmesi gerekir. Bu komponentin yenisinin fiyatı yaklaşık 30000 \$'dır. 3000 TAC'da yapılan kontrolde hasarlı olduğu saptanan komponent yenisi ile değiştirilmek istendiğinde 30000 \$ üreticiye ödenecektir. Oysa HİBM'nde bu komponent yaklaşık 1000 \$'a yenilenerek tekrar kullanılmaktadır.

7) Bir diğer örnek olarak aynı motorun 1. kademe LPT nozulu verilebilir. Bu komponentin fiyatı 100000 \$'dır ve yapılan kontrollerde bir hasara rastlanmadığı müddetçe sınırsız bir ömre sahiptir. 3000 TAC'da yapılan kontrolde hasarlı olduğu saptanan komponent yenisi ile değiştirilmek istendiğinde 100000 \$ üreticiye ödenecektir. Yurt dışında yenilenmesi istendiğinde maliyeti yaklaşık 35000 \$'dır. HİBM'nde bu komponentin yenilenmesi yaklaşık 10000 \$ civarındadır. Birinci kademe LPT nozulunun yenileme kabiliyeti kazanılmadan önce yılda yaklaşık 1 milyon dolar yurt dışına çıkmıştır.

Yapılan değerlendirmeler neticesinde ortaya çıkan sonuçları şu şekilde özetlemek mümkündür:

1) Komponentlerin yenisinin takılması yerine, uygun teknolojilerle yenilenerek tekrar kullanılması sadece işletme ve ülke ekonomisine katkıda bulunmakla kalmamaktadır. Bu gibi onarım ve bakım merkezlerinde yüzlerce kişi istihdam edilmekte ve yeni teknolojik gelişmelere öncülük edilmektedir.

2) Tüm bu kazanımlar oldukça etkileyici görülmektedir. Fakat çalışmada incelenen bu yüksek teknolojili yenileme işlemlerinin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da göz önünde bulundurulmalı ve en uygun seçenek saptanmalıdır.

KAYNAKLAR

1. PATNAICK, P.C. ve THAMBURAJ R., *Development of a qualification methodology for advanced gas turbine engine repairs/reworks*, NATO RTO Meeting Proceedings 17, Canada Communication Group Inc., Quebec, Canada, 11 p. (1999)
2. HASTINGS, R.R., *Aero-engine component repair/replacement decision factors*, NATO RTO Meeting Proceedings 17, Canada Communication Group Inc., Quebec, Canada, 6 p. (1999)
3. MESSLER, R.W., *Joining of advanced materials*, Reed Publishing Inc., USA (1993)
4. LANCASTER, J.F., *Metallurgy of welding*, 4th Ed., Allen and Unwin, UK (1987)
5. BRANDON, D. ve KAPLAN W.D., *Joining processes: an introduction*, John Willey and Sons, UK (1997)
6. *A&P technician airframe textbook*, Jeppesen Sunderson Inc., USA, (1997)
7. HORNE, D.F., *Aircraft production technology*, Cambridge University Press, UK (1985)
8. SALTZMAN, G.A. ve SAHOO P., *Applications of plasma arc weld surfacing in turbine engines*, ASM International, USA, 541-548 (1992)
10. IRWIN, E.T., *Aircraft gas turbine engine technology*, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Co., UK (1979)

11. ASM International Handbook Committee, *Electron beam welding*, ASM Handbook 9th Ed. Volume 6 Welding, Brazing, Soldering, ASM International, USA, 254-261 (1997)
12. ASM International Handbook Committee, *Procedure development and practise considerations for electron beam welding*, ASM Handbook 9th Ed. Volume 6 Welding, Brazing, Soldering, ASM International, USA, 851-860 (1997)
13. MAZUMDER, J., *Laser beam welding*, ASM Handbook 9th Ed. Volume 6 Welding, Brazing, Soldering, ASM International, USA, 262-268 (1997)
14. PELLECIA, M., *Lasers: The manufacturer's outlook*, Nontaditional Conference Proceedings, ASM International, USA, 75-78 (1986)
15. TAEUSCH, D.R., *YAG laser processing in the aircraft industry*, Nontaditional Conference Proceedings, ASM International, USA, 79-95 (1986)
16. McGEOUGH, J. A., *Advanced methods of machining*, Chapman and Hall, USA (1988)
17. SCHWARTZ, M.M., *Fundamentals of brazing*, ASM Handbook 9th Ed. Volume 6 Welding, Brazing, Soldering, ASM International, USA, 114-125 (1997)
18. RAJURKAR, K. P., KOZAK J., ve CHATTERJEE, A., *Nonabrasive finishing methods*, ASM Handbook Volume 5 Surface Engineering, ASM International, USA, 110-116 (1996)
19. PHILLIPS, R.E., *What is electrochemical grinding and how does it work*, Nontaditional Conference Proceedings, ASM International, USA, 65-70

(1986)

20. STEFAN, D., *Manufacturing by electrochemical and spark discharge machining*, Department of Mechanical Engineering University of Bath, UK, <http://www.bath.ac.uk> (2001)
21. RAJURKAR, K. P., *Electrochemical machining*, University of Nebraska Nontraditional Research Center, US, <http://www.unl.edu/nmrc> (2001)
22. LIEVESTRO, T.L., *Electrochemical machining*, ASM Handbook Volume 16 Machining, ASM International, USA, 533-541 (1997)
23. *Technical description of ECM components*, US, [http:// www.rose_hulman.edu](http://www.rose_hulman.edu) (2001)
24. *How ECM works and benefits of ECM*, US, <http://www.sermatec.com> (2001)
25. FULLER, J.E., *Electrical discharge machining*, ASM Handbook Volume 16 Machining, ASM International, USA, 557-561 (1997)
26. SAHOO, P. ve RAGHURAMAN, R., *Gator-Gard® applied coats for thermal barrier coatings*, ASM International, USA, 369-373 (1993)
27. McMORDIE, B.G., *Impact of smooth coatings on the efficiency of modern turbomachinery*, American Electroplaters and Surface Finishers Society, US, 7 p.(2000)
29. MEVREL, R., *High temperature protective coatings: Recent trends*, NATO AGARD Conference Proceedings No. 461, Specialized Printing Services Ltd., Canada, 10 p. (1989)

30. GUPTA A.K., TERADA, T., PATNAIK, P.C., ve IMMARIGEON, J.P., *Evaluation of high temperature protective coatings for gas turbine engines under simulated service conditions*, NATO AGARD Conference Proceedings No. 461, AGARD, Canada, 31 p. (1989)
31. AŞICIOĞLU, E., *Jet motor elemanlarında kullanılan yüzey kaplama yöntemleri*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Eskişehir, Türkiye (1988)
32. SPECHT, R., *Protective coating systems for industrial gas turbine compressor section components*, Sermatech International, USA, 7 p., (1996)
33. SHAW, D.L., *TBC and other surface coatings; benefits and lifing procedures*, NATO RTO Meeting Proceedings 17, Canada Communication Group Inc., Quebec, Canada , 8 p. (1999)
34. MOSSER, M.F., *An improved coating process for steel compressor components- SermeTel Process 5380 DP*, SAE Technical Paper Series 880879, USA, 9 p. (1988)
35. MOSSER, M.F., *Compressor disk corrosion: Problems and solutions*, SAE Technical Paper Series 890916, USA, 12 p. (1989)
36. MOSSER, M.F. ve EDDINGER, K.B., *Environmentally compliant coatings for turbine compressor applications*, AESF 31st Annual Aerospace/Airline Plating and Metal Finishing Forum Proceedings, USA, 6 p. (1995)
37. ALPÉRINE, S., *Molten salt induced high temperature degradation of thermal barrier coatings*, NATO AGARD Conference Proceedings No. 461, Specialized Printing Services Ltd., Canada, 18 p. (1989)

38. MEETHAM, G.W., *Corrosion/oxidation protection of high temperature material*, Materials in Aerospace Volume 1 Proceedings, The Royal Aeronautical Society, UK, 214-233 (1986)
39. HERMAN, H., *Thermal spray coatings*, ASM Handbook 9th Ed. Volume 6 Welding, Brazing, Soldering, ASM International, USA, 1004-1009 (1997)
40. McMORDIE, B.G., *Corrosion and erosion resistant composite coating for turbomachinery blading*, ASM International, USA, 417-422 (1989)
41. *Success stories*, Sermatech Inc., USA, <http://www.sermatec.com> (2001)