

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİLSANİYE Nd:YAG LAZERLE METAL TOZLARIN METAL
YÜZEYLERE KAPLANMASI**

YÜKSEK LİSANS

Fizikçi Serdar BABUR

Anabilim Dalı: Fizik

Danışman: Prof. Dr. Arif DEMİR

KOCAELİ, 2010

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİLİSANİYE Nd:YAG LAZERLE METAL TOZLARIN METAL
YÜZEYLERE KAPLANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serdar BABUR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 18 HAZİRAN 2010

Tezin Savunulduğu Tarih: 30 TEMMUZ 2010

**Tez Danışmanı
Prof.Dr. Arif DEMİR**



**Üye
Prof.Dr. Elşen VELİ**



**Üye
Yrd.Doç.Dr. Hakan ALTAN**



KOCAELİ, 2010

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın hazırlanmasında, sabır ve titizlikle verdiği tüm emeklerle, geleceğe yönelik kazandırdığı bilimsel bakış açısından dolayı değerli hocam Prof. Dr. Arif DEMİR' e teşekkürlerimi sunuyorum.

Yüksek lisans çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen Kocaeli Üniversitesi Öğretim Üyelerinden sayın hocalarım Elif KAÇAR' a ve Timur CANEL' e, deneysel çalışmalarımı gerçekleştirilmemde yardımcı olan Erhan AKMAN' a ve verdikleri destekler den dolayı LATARUM' da ki çalışma arkadaşlarıma teşekkür ediyorum.

Deneysel analizler yapılmasında gerekli olan bütün aletleri kullanımımıza sunan Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanı sayın hocam Muzaffer ZEREN' e ve tüm analizlerin yapılmasında hiçbir yardımı esirgemeyen Kocaeli Üniversitesi Araştırma Görevlileri Hakan ATAPEK' e, Erdem KARAKULAK' a, Fulya KAHRIMAN' a, Enes TURGUT' a ve Funda G. DEMİRCAN' a teşekkür ediyorum.

Yüksek lisans çalışmalarım süresince bana olan güvenlerinden ve gösterdikleri sabırdan dolayı, aileme ve yakınlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	vii
ÖZET.....	x
İNGİLİZCE ÖZET.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LAZER AYGITININ ÇALIŞMA PRENSİBİ VE LAZERİN OLUŞUMU.....	3
2.1. Giriş.....	3
2.2. Lazerin tarihçesi.....	3
2.3. Işığın Soğurulması ve Yayılması.....	4
2.3.1. Işığın soğurulması.....	4
2.3.2. Kendiliğinden geçiş.....	5
2.3.3. Uyarılmış ışıma.....	6
2.3.4. Einstein katsayıları arasındaki ilişki.....	8
2.4. Bir Lazer Üretmek İçin Gerek ve Yeter Şartlar.....	10
2.4.1. Soğurma ve kazanç.....	10
2.4.2. Sayı yoğunluğu tersinimi.....	13
2.4.3. Doyma şiddeti.....	14
2.5. Lazer Işığının Özellikleri.....	14
2.5.1. Koherent.....	15
2.5.2. Tek renklilik.....	16
2.5.3. Paralellik.....	16
2.6. Lazerin Ana Bileşenleri.....	18
2.6.1. Pompalama.....	18
2.6.2. Aktif sistem.....	18
2.6.3. Rezonant kovuğu.....	18
2.7. Lazerin Kullanım Alanları.....	19
3. LAZER İLE YÜZEY KAPLAMA.....	21
3.1. Lazer Yüzey İşlemlerinin Süreçleri.....	22
3.2. Kullanım Alanları.....	23
3.3. Kaplama Yöntemleri.....	25
3.3.1. Alev püskürtme ile kaplama.....	25
3.3.2. Elektrik arkı ile kaplama.....	26
3.3.2.1. Elektrik ark sprey sistemi.....	26
3.3.2.2. Ark apreyin avantajları.....	26
3.3.2.3. Endüstriyel uygulamalar.....	27
3.3.3. Plazma püskürtme ile kaplama.....	27
3.3.3.1. Endüstriyel uygulamalar.....	28
3.4. Lazer Kaplama Yöntemlerinin Klasik Metotlardan Üstünlükleri.....	28

3.5. Lazer Kaplamada Kullanılan Lazerler	29
3.5.1. Nd:YAG lazeri	29
3.5.1.1. Demet gücü	30
3.5.1.2. Uygulama alanları	31
3.5.2. CO ₂ lazeri....	31
3.5.2.1. Demet gücü	33
3.5.2.2. Demet kalitesi.....	34
3.6. Lazer Kaplamada Kullanılan Tozlar....	34
3.6.1. Bir çelik tabakası üzerine uygulanan tozlar	35
3.6.1.1. Kobalt esaslı tozlar	35
3.6.1.2. Nikel esaslı tozlar	35
3.6.1.3. Demir esaslı alaşımlar	36
3.6.1.4. Titanyum ve titanyum esaslı alaşımlar.....	36
3.7. Kaplamada Kullanılan Besleme Üniteleri ve Nozullar.....	37
3.7.1. Kaplamada kullanılan besleme üniteleri	37
3.7.2. Kaplamada kullanılan nozullar	38
3.8. Lazer Kaplamada İşlemi Etkileyen Parametreler.....	39
3.8.1. Seyreklik	40
3.8.2. Gözeneklilik	43
3.8.3. Atım enerjisi.....	43
3.8.4. Toz besleme açısının kaplama yüksekliği ve kalitesi üzerine etkisi....	44
4. LAZER İLE YÜZEY KAPLAMA İŞLEMİNDE KULLANILAN DENEY DÜZENİĞİ: LAZER SİSTEMİ, ÖLÇÜM SİSTEMİ VE MATERYAL.....	47
4.1. Nd:YAG Lazeri ve Deneysel Düzenek.....	47
4.2. Lazer demetinin odağının belirlenmesi.....	50
4.3. Alt Tabaka ve Kaplama Tozu	51
4.4. Paslanmaz Çelik Numunelerinin Kaplama ve Test İşlemlerine Hazırlanması ...	52
4.4.1. Numunelere uygulanan dağlama işlemleri.....	53
5. LAZER İLE YÜZEY KAPLAMA İŞLEMİNDE KAPLAMA KALİTESİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ.....	54
5.1. Atım Enerjisinin Kaplama Yüksekliği Üzerine Etkisi.....	55
5.2. Atım Frekansının Kaplama Yüksekliği Üzerine Etkisi.....	59
5.3. Toz Kütle Akış Oranının Kaplama Üzerine Etkisi	62
5.4. Mikroyapısal Karakterizasyon	65
5.5. Mikrosertlik Değişimi.....	70
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	74
KAYNAKLAR.....	76
KİŞİSEL YAYINLAR.....	80
ÖZ GEÇMİŞ	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Işığın soğurulması.....	4
Şekil 2.2: Kendiliğinden geçiş	5
Şekil 2.3: Uyarılmış ışıma.....	6
Şekil 2.4: Uyarılmış ışıma işlemi boyunca yayılan fotonların çoğalması.....	7
Şekil 2.5: Δx uzunluklu ve birim kesit yüzeyli bir hacmi geçen radyasyon	11
Şekil 2.6: Lazer demetinin farklı parçacıklarının uyumu.....	15
Şekil 2.7: Uyum içinde olmayan fotonların topluluğu.....	15
Şekil 2.8: Lazer kavitesi	16
Şekil 2.9: Özel bir kavite tasarımı.....	17
Şekil 3.1: Yüzey sıcaklığına ve eklenen malzemeye göre lazer yüzey işlemleri.....	23
Şekil 3.2: Isıl püskürtme işlem sırası	25
Şekil 3.3: Plazma ile püskürtme prensip şeması	28
Şekil 3.4: Klasik bir Nd:YAG lazeri	30
Şekil 3.5: Ortalama demet güç aralığı.....	30
Şekil 3.6: Tipik bir karbondioksit lazeri	32
Şekil 3.7: Farklı yöntemlerle üretilen demetlerin güç bölgesi	33
Şekil 3.8: Farklı iki toz besleme ünitesi	38
Şekil 3.9: Tek bir kaplama tabakasının kesit görüntüsü	40
Şekil 3.10: Sayısal bir model sayesinde Stellite 6 ile elde edilmiş lazer kaplamanın işlem diyagramı.....	41
Şekil 3.11: Lazer demetinin hareket hızının seyreklik ve genişlik/yükseklik oranına etkisi.....	42
Şekil 3.12: Kaplama yüksekliklerinin nozul açısının fonksiyonu olarak gösterimi...	45
Şekil 3.13: Isınmayı başlatan lazer ışınına maruz kalan alt tabakadan sekmiş ve sıçramış parçacıklar.....	46
Şekil 4.1: Deneysel çalışmalarda kullanılan Nd:YAG lazer sistemi: güç ünitesi, lazer kovuğu ve odaklama ünitesi (LATARUM).....	48
Şekil 4.2: JK760TR Atımlı Nd:YAG lazerinin kovuğu (LATARUM)	49
Şekil 4.3: Lazer odaklama, nozul ve toz besleme ünitesi	50
Şekil 4.4: Kaplama deneyleri öncesi hazırlanan numuneler... ..	52
Şekil 5.1: Testler sırasında kullanılan uzaklık simgeleri	55
Şekil 5.2: Kaplama yüksekliğinin atım enerjisine göre değişimi.....	57
Şekil 5.3: HAZ bölgesinin atım enerjisine göre değişimi	58
Şekil 5.4: Atım frekansı ile elde edilen kaplamaların optik mikroskop görüntüleri.....	58
Şekil 5.5: Kaplama yüksekliğinin atım frekansına göre değişimi.....	60
Şekil 5.6: HAZ bölgesinin atım frekansına göre değişimi	60
Şekil 5.7: Artan frekans ile elde edilen kaplamaların optik mikroskop görüntüleri	61
Şekil 5.8: Toz kütle akış oranının kaplama yüksekliği ve seyreklik üzerine etkisi ..	63
Şekil 5.9: Toz kütle akış oranına göre HAZ derinliğinin değişimi	64
Şekil 5.10: Lazer odaklama, nozul ve toz besleme ünitesi	64
Şekil 5.11: (a) Altlık malzemeye ait yoğun ikizlenmiş tane yapısını gösteren orijinal mikroyapı	65

(b) Kaplama ara yüzeyine yakın konumda kaba östenitik tane yapısı.....	65
Şekil 5.12: 1A numunesinde (a) kaplama ve (b) kaplama altlık malzeme geçiş bölgesine ait mikroyapı örnekleri	66
Şekil 5.13: 1C numunesinde (a) kaplama ve (b) kaplama altlık malzeme geçiş bölgesine ait mikroyapı örnekleri	67
Şekil 5.14: 1D numunesinde (a) kaplama ve (b) kaplama altlık malzeme geçiş bölgesine ait mikroyapı örnekleri.....	67
Şekil 5.15: 2B numunesinde (a) kaplama ve (b) kaplama altlık malzeme geçiş bölgesine ait mikroyapı örnekleri.....	67
Şekil 5.16: 2D numunesinde (a) kaplama ve (b) kaplama altlık malzeme geçiş bölgesine ait mikroyapı özellikleri.....	68
Şekil 5.17: 2A numunesinde (a) kaplama ve (b) kaplama altlık malzeme geçiş bölgesine ait mikroyapı örnekleri.....	68
Şekil 5.18: 2E numunesinde (a) kaplama ve (b) kaplama altlık malzeme geçiş bölgesine ait mikroyapı örnekleri.....	69
Şekil 5.19: Kaplama hatalarını örnekleyen mikroyapılar, (a) ışık mikroskop ve (b) tarama elektron mikroskop görüntüsü.....	69
Şekil 5.20: Kaplama ile alt tabaka arayüzeyinden başlanarak 100 mikron aralıklarla yapılan Vickers sertlik ölçümü.....	70
Şekil 5.21: Ara yüzeyden 100 mikronluk uzaklıklarla alınan sertlik ölçümleri	72
Şekil 5.22: Kaplama tabakasının sertliği ve seyreklik arasındaki ilişki.....	73

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: Kullanılan operasyon lazerleri	19
Tablo 2.2: Lazerin kullanım alanları	20
Tablo 3.1: Lazer kaplamanın klasik bir Nd:YAG lazeri	24
Tablo 3.2: Tek parça kaplamanın metalurjik incelenmesinin özeti	44
Tablo 3.3: 5A, 5B ve 6A, 6B deneylerinin verileri	45
Tablo 4.1: Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezinde (LATARUM) var olan deneysel çalışmada kullanılan atımlı Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri	48
Tablo 4.2: Stellite 6 tozunun kimyasal bileşimi	51
Tablo 4.3: Kullanılan altlık malzemenin kimyasal bileşimi	52
Tablo 5.1: Atım enerjisinin etkisinin belirlenmesinde kullanılan parametreler	55
Tablo 5.2: Atım enerjisinin kaplama yüksekliği üzerindeki etkisinin belirlenmesinde kullanılan parametreler ve elde edilen sonuçlar	56
Tablo 5.3: Sadece frekansın değişken alındığı deneysel veriler	59
Tablo 5.4: Frekansın artışı ile değişen kaplama yüksekliklerinin ve içine işleme derinliklerinin verileri	59
Tablo 5.5: Toz kütle akış oranının deneysel parametreleri	62
Tablo 5.6: Toz kütle akış oranı değiştirilmesiyle elde edilen deneysel veriler	63
Tablo 5.7: Toz kütle akış oranı değiştirilerek yapılan deneylerin parametreleri	71
Tablo 5.8: Vickers sertlik testi sonucu elde edilen sertlik değerleri	71

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

ΔE	: İki seviye arasındaki enerji farkı
E_2	: Üst enerji seviye enerjisi
E_1	: Alt enerji seviye enerjisi
N_2	: Üst seviyedeki atomların sayısı
N_1	: Alt seviyedeki atomların sayısı
P_{12}	: Uyarılmış soğurma olasılığı
P'_{21}	: Kendiliğinden geçiş olasılığı
P''_{21}	: Uyarılmış ışıma olasılığı
P'_{21}	: Üst seviyeden alt seviyeye toplam geçiş olasılığı
A_{21}	: Kendiliğinden geçiş katsayısı
B_{12}	: Soğurma katsayısı
B_{21}	: Uyarılmış yayılma katsayısı
h	: Planck sabiti
ν	: Işığın frekansı
$u(\nu)$	: Işığın enerji yoğunluğu
k_B	: Boltzman sabiti
T	: Sıcaklık
c	: Işık hızı
$\Delta I(x)$	: Demet şiddetindeki değişim miktarı
$I(x)$	: Demet şiddeti
α	: Soğurma katsayısı
ρ_ν	: Radyasyon yoğunluğu
Δx	: Ortamın kalınlığı
g_2	: Üst seviyenin istatistik ağırlığı
g_1	: Alt seviyenin istatistik ağırlığı
n	: Kırılma indisi
k	: Küçük sinyal kazanç sabiti
I_{doy}	: Doyma şiddeti
$\sigma_{ul}(\nu)$	: Uyarılmış ışıma tesir kesiti

z	: Kazanç ortamının uzunluğu
θ	: Açısal genişlik
λ	: Dalga boyu
r_0	: Demet beli yarıçapı
D	: Seyreklik
h_k	: Kaplama yüksekliği
d_k	: Kaplama derinliği
g_k	: Kaplama genişliği
t_k	: Toplam kaplama yüksekliği
$h_z(HAZ)$	: Isıdan etkilenmiş bölge
Hz	: Hertz
J	: Joule
mm	: Milimetre
cm	: Santimetre
m	: Metre
nm	: Nanometre
μm	: Mikrometre
ms	: Milisaniye
W	: Watt
kW	: Kilowatt
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
W	: Tungsten
Mo	: Molibden
Ni	: Nikel
Al	: Alüminyum
Ti	: Titanyum
V	: Vanadyum
Ta	: Talyum
C	: Karbon
N	: Azot
O	: Oksijen
He	: Helyum
LATARUM	: Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi

CW : Sürekli mod lazer (continuous wave)
Nd:YAG : Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet
HAZ : Hot Affected Zone (Isıdan etkilenmiş Bölge)

MİLİSANİYE Nd:YAG LAZERLE METAL TOZLARIN METAL YÜZEYLERE KAPLANMASI

Serdar BABUR

Anahtar Kelimeler: Lazerle malzeme işleme, sanayide Nd:YAG lazerin uygulamaları, lazer ile kaplama, stellite toz alaşımları.

Özet: Kobalt esaslı stellite toz alaşımları aşınmaya ve paslanmaya karşı gösterdikleri yüksek dirençten dolayı otomotiv, türbin ve uzay endüstrisinde yaygın olarak tercih edilen bir alaşımdır. Endüstride kullanılan metal makine parçaları yüksek ısıya ve su damlacıklarına maruz kalırlar. Bu parçaların yaşam ömürlerini uzatmak için birçok yüzey kaplama metodu gerçekleştirilmiştir. Lazer kaplama yöntemi ile elde edilen kaplamalar diğer kaplama yöntemleriyle karşılaştırıldığında saflık, homojenlik, sertlik, birbirine bağlanma ve mikro yapı bakımından daha üstün bir tekniktir. Kaplama malzemesinin daha verimli olabilmesi ve kaliteli kaplama tabakaları elde edebilmek için alt tabaka ile kaplama malzemesinin arasındaki karışım çok az olmalıdır. Modern Nd:YAG lazerleri, kHz mertebelerinde bile her bir atımın zamana bağlı profilini değiştirebilecek özelliğe sahiptirler. Bu özellik, malzeme içine olan ısı girişini rahat bir şekilde kontrol etme imkânı verir. Atımlı lazer kaynağı ve toz besleme için, atım enerjisi, atım frekansı, üst üste binme oranı, toz kütle akış oranı ve seyreklik kaplama tabakasının yüksekliğini ve kalitesini etkileyen temel parametrelerdir.

Bu çalışmada, lazer kaplama deneyleri ısı kaynağı olarak Lumonics JK760TR Nd:YAG lazerinin kullanılmasıyla gerçekleştirildi. Stellite 6 kaplama tozunu homojen bir şekilde taşımak için Sulzer Metco toz besleme ünitesi kullanıldı. Stellite 6 toz alaşımı ve atımlı lazer kullanarak yapılan deneyler ile kaplama parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Seyreklik lazer kaplama tabakasının kalitesini etkileyen en önemli parametredir. 12 J'lük atım enerjisi, 25 Hz'lik atım frekansı ve % 80'lik üst üste binme oranıyla en düşük seyreklik değeri (%9.1) elde edilmiştir.

COATING OF THE METALIC POWDERS TO METALIC SURFACE USING MILISECOND PULSED LASER

Serdar BABUR

Key words: Laser material processing, pulsed Nd:YAG laser applications in industry, laser cladding, Stellite powder alloy.

Abstract: Cobalt-based Stellite powders have shown a high resistance against wear and corrosion and due to this the automotive, turbine and aerospace industries prefer this alloy is a kind of common. Industrial metal machine parts are exposed to high temperature and water droplets are regularly. Laser cladding techniques, compared to other hard facing techniques, have superior properties in terms of pureness, homogeneity, hardness, bonding and microstructure. The mixing between the clad layer and substrate materials must be as small as possible to utilise the properties of the coating material effectively and to achieve good quality clad layers. Modern Nd:YAG lasers have the ability to shape the temporal profile of each pulse at repetition rates of up to several kHz. This property gives control of thermal input in the material. Pulse energy, pulse frequency, overlap, powder mass flow rate and dilution are the main parameters that have influences on the cladding quality.

In this thesis, laser cladding experiments were carried out using Lumonics JK760 Nd:YAG pulsed laser. Cladding was accomplished by delivering the Stellite 6 powder homogeneously through a powder feeder (model: Sulzer Metco). Cladding parameters were determined by obtained experiments with using Stellite 6 powder alloy and the pulsed laser. It was found that dilution was the most important parameter that affected the quality of clad layer. The lowest dilution was obtained the value (9.1 %) at an incident energy of 12 J/pulse, pulse frequency of 25 Hz and spot overlap of 80 %.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin çok hızlı bir şekilde gelişim göstermesinden dolayı birçok farklı yöntem ve farklı malzemenin kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Lazerin odaklandığı bölgede yüksek enerji yoğunluğuna ulaşabilmesinden dolayı özellikle lokal yüzey işlemlerinde birçok kolaylık sağlanmıştır. Lazerin sanayide kullanılmaya başlanmasıyla birlikte malzemeler üzerinde işlem yapmak daha kolay hale gelmiş olup diğer yöntemlerde karşılaşılan sorunların büyük bir bölümü çözülmüştür. Yapılan bu tez çalışmasında otomotiv sektöründen uzay endüstrisine, nükleer sanayiden kimya endüstrisine kadar farklı birçok alanda kullanılmakta olan atımlı Nd:YAG lazeri ile malzemelerin yüzey sertliğini arttırmak ve aşınmaya karşı daha dayanıklı hale getirmek için kullanılan kobalt temelli stellite serisinden stellite 6 tozu kullanılarak yüzey kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 2’de lazerin genel olarak çalışma prensipleri, lazer oluşturmak için gerek ve yeter koşullar, lazerin kısa bir tarihçesi, lazer ışığını diğer ışık kaynaklarından ayıran özellikler ile lazerin kullanım alanları hakkında literatür bilgisi verilecektir.

BÖLÜM 3’te lazer ile yüzey kaplamada kullanılan lazer, toz ve nozul çeşitleri ile işlem sırasında meydana gelen fiziksel olaylar, diğer kaplama çeşitleri ve lazer parametreleri ile toz besleme ünitesinin parametrelerinin kaplama kalitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

BÖLÜM 4’te yapılan deneysel çalışmada kullanılan lazer sistemi ile deneysel düzenek incelenecek ve kaplamada alt tabaka olarak kullanılan paslanmaz çelik hakkında bilgi verilecek.

BÖLÜM 5’te kurulan deneysel düzenek ile iyi bir kaplama yapabilmek için gerekli parametreler elde edilmeye çalışılmış ve bu parametreler ile yapılan deneylerde elde edilen kaplanmış malzemenin yapılan testleri sonucunda gerekli bilgi ve grafikleri verilmiştir.

BÖLÜM 6’da bu tezde yapılan çalışmaların sonuçları özetlenerek, gelecekte yapılması olası çalışmalara değinilmiştir.

BÖLÜM 2. LAZER AYGITININ ÇALIŞMA PRENSİBİ VE LAZERİN OLUŞUMU

2.1. Giriş

Albert Einstein tarafından 1917 yılında ortaya atılan “uyarılmış ışımaya” kavramı kullanılarak temellerinin oluşturulduğu LASER, “Light Amplification of the Stimulated Emission of Radiation” sözcüklerinin baş harfleri kullanılarak oluşturulmuştur [1,2,3,4]. Uyarılmış ışımaya yayılımıyla ışığın kuvvetlendirilmesi manasına gelen lazer, tek renkli, yoğun ve aynı fazda paralel dalgalar şeklinde güçlü ışık demeti üreten bir alettir [1,5,6]. Lazer, tıp, haberleşme, savunma sanayi, otomotiv sanayi, uzay sanayi, holografi ve fotoğrafçılık gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu bölümde lazer ile ilgili kısa bir tarihsel bilgi ile birlikte lazer aygıtının çalışma prensibi, lazer oluşturmak için gerek ve yeter koşullar, lazerin oluşumu ve kullanım alanları ile ilgili temel literatür bilgileri verilecektir.

2.2. Lazerin Tarihçesi

1917 yılında Albert Einstein’ın ileri sürdüğü uyarılmış ışımaya kavramının varlığı 1928 yılında Rudolph W. LANDENBURG tarafından kanıtlanmış ayrıca negatif soğurma kuramını ortaya atmıştır [2,3,6]. 1947 yılında Willis E. LAMB ve R. C. RETHERFORD uyarılmış ışımaya kavramının ilk gösterimini gerçekleştirmişlerdir [6]. 1951 yılında uyarılmış ışımaya dayanan ilk alet Kolombiya Üniversitesinde Charles H. TOWNES tarafından geliştirildi. Ayrıca Maryland Üniversitesinde Joseph WEBER ve Alexander PROKHOROV, Lebedev Laboratuvarında Nikolai G. BASOV birbirlerinden bağımsız olarak maser aletini geliştirmişlerdir. 1964 yılında bu çalışmadan dolayı Charles H. TOWNES, Alexander PROKHOROV ve Nikolai G.

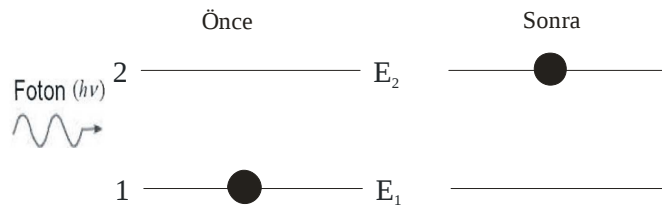
BASOV Nobel ödülü kazandılar. MASER, 1.25 cm de elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde uyumlu bir ışıma yaptığı için “Microvawe Amplification by the Stimulated Emission of Radiation” kelimelerinin baş harfleri kullanılarak oluşturulmuştur [1,3,6,]. 1958 yılında Charles H. TOWNES ve Arthur L. SCHAWLOW maser tarafından üretilen demetin kuvvetlendirilmesi için optik bir sistem tasarlamışlar ve bu çalışmaları ile Nobel ödülü kazanmışlardır. Theodore MAINMAN kazanç ortamı olarak yakut kristalini ve uyarıcı kaynak olarak ta flaş lambalarını kullanarak 1960 yılında ilk lazeri keşfetmiştir [2, 3, 5, 6].

2.3. Işığın Soğurulması ve Yayılması

Atomun herhangi iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkına eşit değerde bir enerji verilmesiyle atom uyarılmış olabilmektedir. Kısa bir süre sonra atom daha düşük bir enerji seviyesine geçerek ışıma yapar. Eğer atom $E_2 - E_1 = h\nu$ enerjisine sahip bir fotonu soğurur veya yayarsa elektron E_1 ve E_2 enerji seviyeleri arasında bir geçiş yapar [1,4,5,6].

2.3.1. Işığın soğurulması

Düşük sıcaklıklarda atomların çoğu daha düşük enerji seviyelerinde bulunurlar. Eğer atom başlangıçta daha düşük enerji seviyesi E_1 de bulunuyorsa $h\nu$ enerji değerine sahip bir foton soğurarak daha üst enerji seviyesi olan E_2 ye geçebilir. Bu olay ışığın soğurulması olarak adlandırılır ve geçiş şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Işığın soğurulması.

İki seviye arasındaki enerji farkı;

$$E_2 = E_1 + h\nu \quad (2.1)$$

$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu \quad (2.2)$$

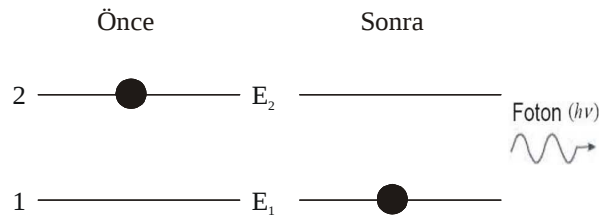
olarak ifade edilir. Burada h ; Planck sabiti ve ν ; ışığın frekansıdır. Seviye 1'den 2'ye geçerken soğurma olayının olasılığı ışığın enerji yoğunluğu ile orantılı olup,

$$P_{12} = B_{12}u(\nu) \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada olasılık sabiti B_{12} ; ışığın Einstein soğurma katsayısı, $u(\nu)$; ışığın enerji yoğunluğu olarak bilinir [1,4,5,6].

2.3.2. Kendiliğinden geçiş

Eğer bir atom başlangıçta daha yüksek enerji seviyesi olan E_2 'de ise $h\nu$ enerjisine sahip bir foton yayarak daha düşük bir enerji seviyesi olan E_1 'e geçer. Bu olay kendiliğinden geçiş olarak bilinir. Bu doğal ışıma olayı bütün malzemelerin tüm uyarılmış seviyelerin doğasında vardır. Bu geçiş şekil 2.2'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.2: Kendiliğinden geçiş.

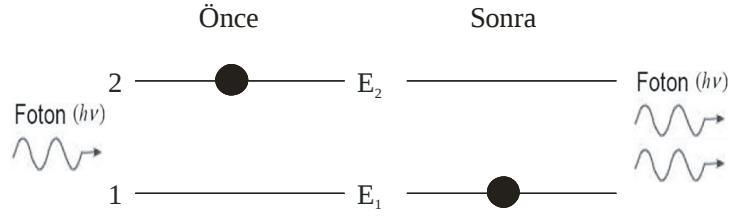
Seviye 2'den seviye 1'e kendiliğinden geçiş olayının olasılığı sadece seviye 2 ve 1'in özelliklerine bağlıdır ve ışığın enerji yoğunluğu;

$$P'_{21} = A_{21} \quad (2.4)$$

şeklinde. Burada A_{21} ; Einstein' in kendiliğinden geçiş katsayısıdır [1,4,5,6].

2.3.3. Uyarılmış ışıma

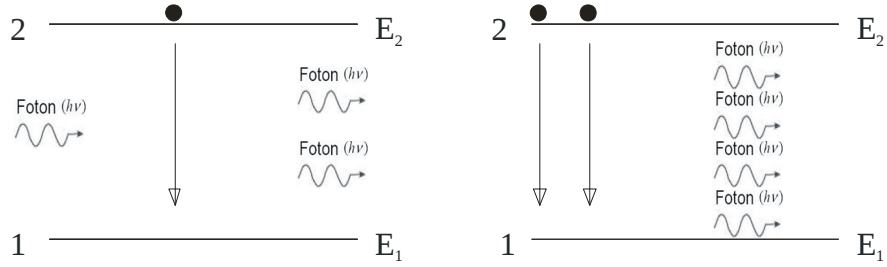
Einstein üçüncü bir olasılık olan uyarılmış ışımadan bahseden ilk kişiydi. Uyarılmış ışıma, enerjisi $h\nu$ olan bir foton şekil 2.3'de gösterildiği gibi daha üst E_2 'den daha alt seviye E_1 'e geçişe sebep olur.



Şekil 2.3: Uyarılmış ışıma.

Bu olay termal dengedeki atomların sisteminde $h\nu = \Delta E = E_2 - E_1$ olduğu zaman meydana gelir. Genelde temel seviyede bulunan atomların sayısı daha üst seviyelerdekenden daha fazladır. Bu durum mevcut enerji seviyeleri arasında atomların normal nüfusu olarak bilinir. Daha yüksek enerji seviyesindeki atomların sayısı daha düşük bir seviyedeki atomların sayısından fazla olduğu bir durum sayı yoğunluğu tersinimi olarak bilinir. Üst seviyede bulunan elektronların sayısı oldukça büyük olduğu zaman gelen foton daha düşük seviyeye geçiş için elektronu uyarır ve atom aynı enerjiye sahip ikinci bir foton üretir. Eğer sistemde iki seviye arasında sayı yoğunluğu tersinimi meydana geliyorsa lazer demetinin ışıma ile kuvvetlenmesi olası bir durumdur. Dolayısıyla lazer ışığını büyütmek için ön koşul nüfus tersinimidir. Yayılan fotonlar birbirleriyle ilişkili belirli bir faz ve zamana sahip olduklarından dolayı ışık yüksek ölçüde bir uyuma (coherence) sahiptir. Eğer bu uyarılmış fotonlar bir atom topluluğundan geçerse nüfus tersinimi koşulu yerine getirilmiş olur ve ışık

büyümüş olur. Bu büyüme şekil 2.4'te gösterilmektedir (Uyarılmış yayılma işlemi boyunca yayılan fotonların çoğalmasını gösterir).



Şekil 2.4: Uyarılmış ışılma işlemi boyunca yayılan fotonların çoğalması.

Daha üst seviye 2'den daha alt seviye 1'e doğru gerçekleşen uyarılmış ışılma geçişinin meydana gelme olasılığı ışığın enerji yoğunluğu olan $u(\nu)$ 'ye bağlıdır ve ifadesi;

$$P''_{21} = B_{21} u(\nu) \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada B_{21} ; ışığın uyarılmış yayılımının Einstein katsayısıdır. Üst seviye 2'den alt seviye 1'e olan ışılma geçişinin toplam olasılığı;

$$P_{21} = P'_{21} + P''_{21} \quad (2.6)$$

veya

$$P_{21} = A_{21} + B_{21} u(\nu) \quad (2.7)$$

olarak bulunur [1,4].

2.3.4. Einstein katsayıları arasındaki ilişki

Seviye 1 ve 2 deki her anda bulunan atomların sayısını sırasıyla N_1 ve N_2 alırsak her birim zaman başına seviye 1'den seviye 2'ye geçen atomların sayısı için soğurma geçişinin olasılığı;

$$N_1 P_{12} = N_1 B_1 u(\nu) \quad (2.8)$$

formülüyle ifade edilir. Seviye 2'den seviye 1'e geçen atomların sayısı hem kendiliğinden geçiş hem de uyarılmış ışıma için her birim zaman başına geçişin toplam olasılığı;

$$N_2 P_{21} = N_2 [A_{21} + B_{21} u(\nu)] \quad (2.9)$$

şeklindedir. T sıcaklığında termal dengede soğurma ve ışıma olasılıkları eşit olup,

$$N_1 P_{12} = N_2 P_{21} \quad (2.10)$$

İfadesiyle gösterilir. İfade (2.8) ve (2.9) bu formülde yerine konup gerekli düzenlemeler yapılırsa ışığın spektral enerji yoğunluğu;

$$u(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{(N_1 / N_2)(B_{12} / B_{21}) - 1} \quad (2.11)$$

olur. Ayrıca Einstein'ın öngördüğü

$$g_1 B_{12} = g_2 B_{21} \quad (2.12)$$

durumu denklem (2.11)'e uygulandığında;

$$u(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{(N_1 / N_2) - 1} \quad (2.13)$$

ifadesi elde edilir. Boltzmann yasasına göre T sıcaklığında termal dengede bulunan E_1 ve E_2 enerji seviyelerindeki atomların dağılımı

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{e^{-E_1/k_B T}}{e^{-E_2/k_B T}} = e^{(E_2 - E_1)/k_B T} \quad (2.14)$$

veya

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{h\nu/k_B T} \quad (2.15)$$

olur. Burada k_B ; Boltzmann sabitidir. Eşitlik (2.13) göze alındığında,

$$u(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1} \quad (2.16)$$

yazılabilir. Plank'ın ışık formülü, ışığın spektral enerji yoğunluğu olan $u(\nu)$ 'i;

$$u(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1} \quad (2.17)$$

olarak verir. Eşitlik (2.16) ve (2.17) karşılaştırıldığında,

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \quad (2.18)$$

elde edilir. Eşitlik (2.18) kendiliğinden ışıma ve uyarılmış ışıma arasındaki ilişkiyi verir. Bu ayrıca Einstein katsayıları A ve B arasındaki ilişki olarak bilinir [1].

2.4. Bir Lazer Üretmek İçin Gerek ve Yeter Şartlar

2.4.1. Soğurma ve kazanç

Birim kesit alanlı, tek renkli ve yönelmiş bir demetin bir ortamdan geçerken şiddetinde meydana gelen değişikliği basit bir şekilde anlamak için E_1 ve E_2 enerji seviyeleri arasındaki tek bir elektron geçişinin meydana geldiğini varsayalım. Bu demet şiddetindeki değişim miktarını uzaklığın bir fonksiyonu olarak ifade edersek,

$$\Delta I(x) = I(x + \Delta x) - I(x) \quad (2.19)$$

şeklinde olacaktır. Ortamın homojenliği durumunda $\Delta I(x)$ ifadesi hem Δx mesafesine hem de $I(x)$ şiddetine bağlı olacaktır. $\Delta I(x)$ ifadesini soğurma sabiti olan α 'yı kullanarak yazarsak,

$$\Delta I(x) = -\alpha I(x) \Delta x \quad (2.20)$$

şeklinde olur. Burada α pozitif nicelik olup (-) işareti soğurmada dolayı şiddette azalma meydana geleceğini gösterir. Denklemin diferansiyel formu;

$$\frac{dI(x)}{dx} = -\alpha I(x) \quad (2.21)$$

şeklinde olup her iki tarafın entegrali alınır,

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (2.22)$$

bulunur. Burada I_0 ; gelen radyasyonun şiddetidir. Soğurma katsayısı olan α , E_1 ve E_2 enerji seviyelerinde bulunan atomların sayılarına bağlı olarak değişecektir. Eğer daha üst seviye olan E_2 seviyesindeki atomların sayısı olan N_2 sıfır olursa soğurma

maksimum olacaktır. Bu durumun tersi olarak daha düşük seviye olan E_1 seviyesindeki atomların sayısı olan N_1 sıfır olursa bu seferde uyarılmış ışımaya maksimum olacaktır.

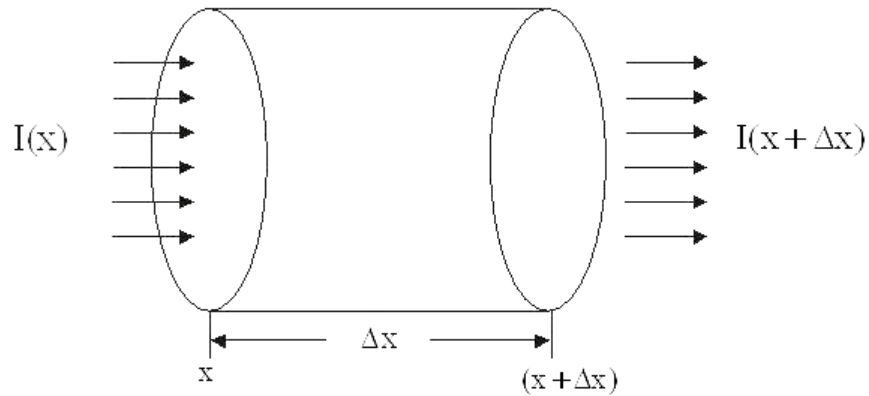
Demet, birim kesit yüzey alanını ve Δx kalınlığındaki ortamı geçerken foton kaybına uğrayacaktır. Birim hacim başına foton kaybının net oranı;

$$-\frac{dN}{dt} = N_1 \rho_v B_{12} - N_2 \rho_v B_{21} \quad (2.23)$$

olur ve bu ifade $g_1 B_{12} = g_2 B_{21}$ eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$-\frac{dN}{dt} = \left(\frac{g_2}{g_1} N_1 - N_2 \right) \rho_v B_{21} \quad (2.24)$$

formunda olur. Kendiliğinden ışımadaki oluşan fotonların yönleri rastgele olduğundan yönlendirilmiş demet için etkisi ihmal edilebilir. Benzer şekilde yönlendirilmiş demet için saçılma kayıplarını da ihmal edebiliriz.



Şekil 2.5: Δx uzunluklu ve birim kesit yüzeyli bir hacmi geçen radyasyon.

Birim zamanda birim yüzeyden geçen enerji miktarını göz önünde bulundurduğumuz zaman ν frekanslı fotonlara sahip demetin şiddeti;

$$Iv = \rho_v c / n = Nhvc / n \quad (2.25)$$

şeklinde ifade edilir. Burada c ; ışığın boşluktaki hızı ve n ; ortamın kırılma indisidir. Demetin ortamdaki geçerken sahip olduğu foton yoğunluğundaki değişmeyi;

$$-dN(x) = [I(x) - I(x + \Delta x)] \frac{n}{hv_{21}c} \quad (2.26)$$

olarak ifade edebiliriz. Δx kalınlığı küçükse bu eşitlik;

$$-dN(x) = \frac{dI(x)}{dx} \frac{1}{hv_{21}} \quad (2.27)$$

şeklinde yazılabilir. Bir dt zaman aralığında foton yoğunluğundaki değişme oranı;

$$\frac{dN(x)}{dt} = \frac{dI(x)}{dx} \frac{1}{hv_{21}} \quad (2.28)$$

olur. Buradaki $\frac{dI(x)}{dx}$ ifadesi yerine (2.21) denklemini yazılırsa,

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha I(x) \frac{1}{hv_{21}} = -\alpha \rho_v \frac{c}{n} \frac{1}{hv_{21}} \quad (2.29)$$

olarak bulunur. Burada (2.24) ifadesindeki $\frac{dN}{dt}$ yerine (2.29) ifadesi yazılırsa,

$$\alpha = \left(\frac{g_2}{g_1} N_1 - N_2 \right) \frac{B_{21} hv_{21} n}{c} \quad (2.30)$$

ifadesi elde edilir. Denklemden de anlaşılacağı gibi α soğurma katsayısı, E_1 ve E_2 enerji seviyelerindeki N_1 ve N_2 nüfus yoğunluklarının farkına bağlıdır. Bir atom grubu ısı dengede ise $E_2 > E_1$ olacağı için $(g_2 / g_1)N_1$ daima N_2 'den büyük olacaktır ve bunun sonucu olarak ta α pozitif bir değere sahip olacaktır. Ayrıca N_2 'nin $(g_2 / g_1)N_1$ 'den büyük olduğu bir durum meydana getirilirse α negatif bir değere sahip olacağından $-\alpha x$ ifadesi pozitif olacaktır. Bu durumda,

$$I = I_0 \exp(kx) \quad (2.31)$$

ifadesi dikkate alındığında ortamdan geçen demetin şiddetinin artacağı manasına gelir. Böylece demet ortamda yol kat ettikçe büyüyecektir. Burada k ; küçük sinyal kazanç sabiti olarak ifade edilir ve bu ifadeyi;

$$k = \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right) B_{21} \frac{h\nu_{21}n}{c} \quad (2.32)$$

şeklinde yazabiliriz [7].

2.4.2. Sayı yoğunluğu tersinimi

Sistemi ters çevirme durumu pompalama olarak adlandırılır ve pompalama optik, elektrik vs gibi yöntemlerle meydana getirilebilir. Pompalama metotlarından bir tanesi uyarılmış soğurmadır. Bu metotta lazer oluşması için kullanılması planlanan enerji seviyeleri, sistemin şiddetli bir şekilde aydınlatılmasıyla pompalanır. Bu durumda $g_1 = g_2$ varsayımından dolayı B_{12} ile B_{21} birbirlerine eşit olacakları için atomlar bir kere üst seviyeye uyarıldıkları zaman, daha üstteki bir seviyeye uyarılma olasılığı ile daha alt bir seviyeye inme olasılığı eşit olur. Bu durum iki seviyeli sistemlerde nüfus sayılarının eşit olabileceği anlamına gelir. Bu sebeple nüfus tersinimi elde etmek için üç veya dört seviyeli durumlara bakmamız gerekir. Eğer atom şiddetli bir şekilde aydınlatılabilirse elektronlar en alt seviye olan E_0 'dan E_2 seviyesine pompalanabilirler. Daha sonra elektronlar E_2 seviyesinden E_1 seviyesine

foton salmadan inerler ve E_1 ile E_0 seviyeleri arasında nüfus tersinmesi elde edilir. Nüfus tersinimi lazer için gerek şarttır [5,7].

2.4.3. Doyma şiddeti

Eğer üstel katsayı yeteri büyüklükte ve pozitif bir değerde ise o zaman z uzunluğundaki bir kazanç ortamı içerisinde geçen bir demetin hızlı bir şekilde büyümesini gösteren denklem

$$I = I_0 e^{\sigma_{ul}[N_u - (g_u / g_l)N_l]z} \quad (2.33)$$

Eşitliği ile ifade edilir. Kazanç değerini düşündüğümüzde denklem (2.33)'deki üstel ifade demetin büyümesi için yeterlidir. Eğer biz bu durumda kazanç ortamının uzunluğunu arttırsak buna bağlı olarak I şiddeti üstel olarak artacaktır. Fakat bir noktadan sonra üst seviyede biriken enerjinin yetersiz kalması nedeniyle demetin şiddeti üstel olarak büyümeyecektir. Bu nedenle doyma işleminin meydana geldiği noktada bir sınır olmak zorundadır. Bu durumda şiddet ifadesi

$$I_{doy} = \frac{h\nu_{ul}}{\sigma_{ul}(\nu)\tau_u} \quad (2.34)$$

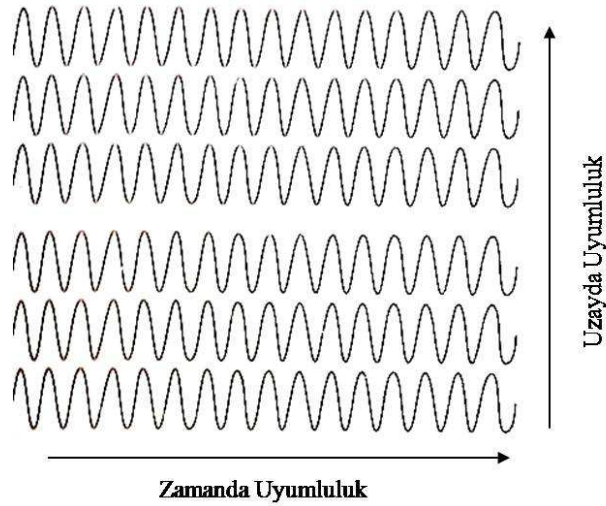
Doyma şiddeti lazer için yeter şarttır [5].

2.5. Lazer Işığının Özelliği

Bilindiği üzere lazer ışığı uyarılmış ışıma işlemi tarafından elde edilir ve lazer demeti yüksek oranda şiddetli ve yönelimlidir. Lazer ışığı temel özelliklere sahiptir.

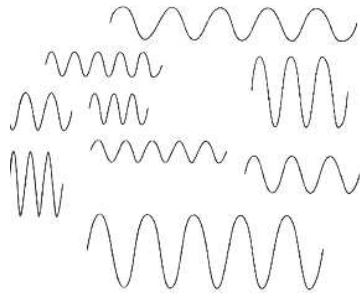
2.5.1. Koherent

Basit olarak koherent'in anlamı yüksek ölçüde düzenlenmiş demektir. Koherent kelimesi birbirine yapışık anlamında olan Cohero kelimesinden gelmektedir. Gerçektende lazer demetinin farklı parçaları şekil 2.6'da gösterildiği gibi birbirleri ile belli bir ilişkiye sahiptir. Bu uyum, yüksek ölçüde girişim elde etmek için gerekli olan zamansal ve uzaysal uyum olarak tanımlanır.



Şekil 2.6: Lazer demetinin farklı parçalarının uyumu [1].

Sıradan ışık, 10^{-8} saniyelik bir zamanda bağımsız atomlardan yayıldığı için koherent değildir. Koherent olmayan fotonların bir dizisi şekil 2.7'de görüldüğü gibi bir düzen içerisinde değildir.



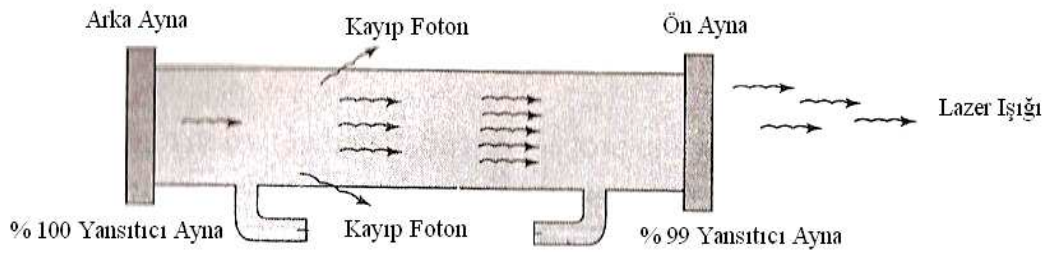
Şekil 2.7: Uyum içinde olmayan fotonların topluluğu [1].

2.5.2. Tek renklilik

Tek renkli olma durumunu renkteki veya dalga boyundaki saflık olarak ifade edebiliriz. Genellikle lazerden çıkan ışık atomik bir geçişten meydana gelir ve belirli tek bir dalga boyuna sahiptir. Bundan dolayı lazer ışığı tek bir spektral renge ve nerdeyse tek bir dalga boyuna sahiptir. Bu lazer ışığının tam olarak monokromatik olmadığı anlamına gelir fakat yüksek derecede monokromatikliğe sahiptir. Monokromatiklikten sapma, hareket eden atomların veya moleküllerin meydana getirdiği ışımanın Doppler etkisinden dolayı oluşmaktadır [1,6].

2.5.3. Paralellik

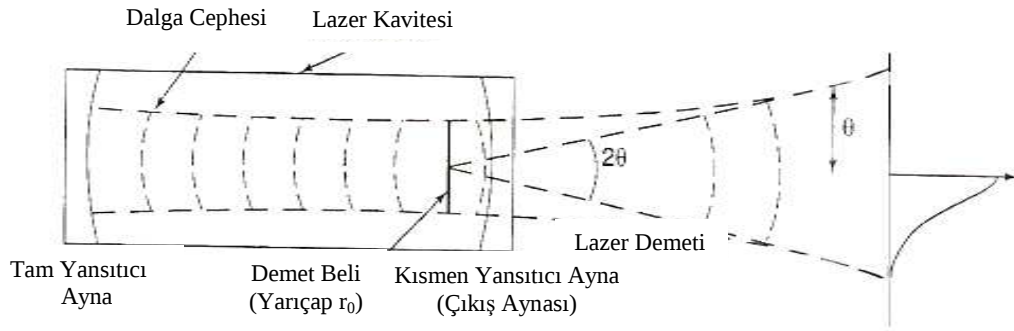
Anlam olarak ışığın çok dağılmaması(genişlememesi) demektir. Tipik bir lazerden meydana gelen ışık, çok küçük bir ıraksaklığa ve aşırı derecede inceliğe sahip bir demettir. Bu demet büyük ölçüde paralelleşmiştir. Yüksek derecede paralellik Şekil 2.8’de gösterildiği gibi birbirine paralel olan ve karşılıklı yerleştirilmiş ön ve arka aynalara sahip olan lazer kavitesin’den kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.8: Lazer Kavitesi[1].

Işığın aynalardan yansdıktan sonra paralel bir yol elde etmesine bu sebep olur. Bu sistemde arkadaki ayna %100 yansıtıcılığa sahipken öndeki ayna yaklaşık % 99’luk bir yansıtıcılığa sahiptir. Dolayısıyla sistemde oluşan demetin %1’lik kısmı dışarıya çıkar. Bu işlemde aynı dalga boyunda daha çok fotonun uyarılmış ışması ile şiddetli

kazanç elde etmek için ışık ön ve arka aynalar arasında defalarca gidip gelmektedir. Eğer ışık bir parça eksen dışına çıkarsa demetten kopmuş olacaktır. Bir lazer demetinin yönelimi veya yüksek derecede paralellığı lazer kavitesinin geometrik tasarım'ından kaynaklanır ve gerçekten uyarılmış ışıma işleminde çift foton üretilir. Özel bir kavite tasarımı Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Burada bir demetin açısal genişliği θ açısı tarafından belirtilir. Kavite içindeki aynalar iç bükümlü yüzleri kaviteye bakacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu yolla ışık kavite içinde geriye odaklanır ve bu olay sonunda kavite içindeki bir pozisyonda r_0 yarıçaplı bir demet belisi oluşturur.



Şekil 2.9: Özel bir kavite tasarımı [1].

Temel TEM_{00} modu olarak lazer demeti dikkate alındığında, yarım açı demet genişlemesi olabilir ve formül olarak;

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi r_0} \quad (2.35)$$

yazılabilir. Buradan elde edilen açısal genlik;

$$2\theta = \frac{0.637\lambda}{r_0} \quad (2.36)$$

şeklinde olur [1].

2.6. Lazerin Ana Bileşenleri

Tipik bir lazer sistemini oluşturan ana bileşenleri, pompalama, aktif sistem ve optik kovuk olarak sıralayabiliriz.

2.6.1. Pompalama

Atomların veya moleküllerin daha düşük enerji seviyesinden daha yüksek enerji seviyesine çıkarılması metodu optik pompalama olarak adlandırılır. Optik pompalama uyarılmış ışıma için ön koşul olan nüfus tersinimi elde etmek için gereklidir. Bu durum gerçekleştiğinde uyarılmış ışıma oranı uyarılmış soğurma oranını geçecektir. Yani ışığın şiddeti ortam içinden her geçiş boyunca artacaktır.

2.6.2. Aktif sistem

Bir lazer için kazanç ortamı veya aktif sistem olarak adlandırılır ve nüfus tersinimi elde etmek için kullanılır. Lazer sistemleri kazanç ortamının karakterine göre adlandırılır. Bu bir gaz, sıvı veya katı olabilir. Kazanç ortamındaki enerji seviyeleri lazer ışınının dalga boyunu belirler. Lazer etkisi, bilinen elementlerin yarısından fazlasında gözlenmiştir. Gazlar içinde en popüler iki geçişin biri Neondan 632.8 nm de ışıma görünür ve bir diğeri CO₂ molekülünden olan 10.6 µm de kızılötesi ışımadır.

2.6.3. Resonant kovuğu

Bir lazer sistemindeki optik kovuk içindeki kazanç ortamı, bir tanesinin yüzeyi tam yansıtıcı diğeri yüzeyi ise kısmen yansıtıcı olan ve birbirine göre iki paralel yüzeyin kullanımıyla çevrelenmiştir. Bu kovuk içindeki fotonların yoğunluğu uyarılmış ışıma işlemiyle artar.

2.7. Lazerin Kullanım Alanları

Günümüzde lazer, endüstride birçok kullanım alanına sahiptir. Lazerin sahip olduğu yüksek güç sayesinde malzemeler üzerinde kaplama, delme, kesme, kaynak ve yüzeysel tavlama gibi işlemler rahatlıkla uygulanabilir. Lazer ile malzeme işleme esnasında malzemeye herhangi bir mekaniksel temas bulunmadığından dolayı işlenen malzemede herhangi bir yıpranma veya kırılma meydana gelmez. Lazerin mekaniksel temas olmadan uygulanabiliyor olmasından dolayı kâğıt, kauçuk ve plastik gibi yumuşak malzemeler rahatça işleme tabi tutulabilir. Lazer ışığının sahip olduğu parlaklık ve monokromatiklik fotokimya ve spektroskopide kullanılan eski yöntemlerin geliştirilmesini sağlamıştır. Kimyada lazer, fotosentez, element tayini ve fotokimya gibi yöntemlerde kullanılır.

Tıp alanında Ruby, Argon, Nd:YAG ve CO₂ lazer sistemlerinin kullanımı oldukça fazladır. Bu lazerlerin cerrahi, göz hastalıkları ve mikro cerrahideki kullanımı şekil 8.5.1 de gösterilmiştir. Mikro cerrahide lazer ses telleri, kronik larenjit ve polip gibi rahatsızlıkların tedavisinde etkili bir yöntemdir. Ayrıca lazer yarayı kesme, buharlaştırma ve göz hastalıkları tedavisi gibi işlemler içinde kullanılır [4,5].

Tablo 2.1: Kullanılan operasyon lazerleri [4].

Lazer Tipi	Dalga Boyu μm	Çıkış Gücü W	Soğurma Derinliği mm	Temel Uygulamalar
CO ₂	10.6	≤ 500	0.05	Kesme, Buharlaştırma
Argon	0.488-0.514	≤ 20	0.2	Yüzeysel deri nodülleri, Sinirsel operasyonlar, Retina dokusunun pıhtılaşması
Nd-YAG	1.06	≤ 100	0.8-2.0	Kanama pıhtılaşdırımı
Ruby He-Ne	0.6943 0.693	$> 10^6$ 0.8-2.0	- -	Oftalmoloji, Koyu deri nodülleri, Bulucu demet

Tüm bu kullanım alanlarına ek olarak lazer, holografi, parçacık analizi, enerji iletimi, mikroskopik araştırmalar, radarlar ve silahların yönlendirilmesi gibi askeriye, oyuncak ve eğlence sektöründe de oldukça yaygın bir kullanım alanına sahip olup Tablo 2.2’de lazerin kullanım alanları gösterilmiştir.

Tablo 2.2: Lazerin kullanım alanları [6].



BÖLÜM 3. LAZER İLE YÜZEY KAPLAMA

Günümüz endüstrisinde, mekaniksel parçaların yüzeylerini sürtünmeye, aşınmaya ve paslanmaya karşı daha dayanıklı hale getirmek ve hasar gören parçaları onarmak için birkaç termal yüzey işlemi mevcuttur. Plazma püskürtme (plasma spraying), alev püskürtme (flame spraying) ve elektrik kaynağı (arc welding) gibi teknikler bu yüzey işlemlerinden bazılarıdır [8,9].

Bu tekniklerin amacı, yüzey özellikleri yeteri kadar iyi olmayan ve ekonomik olarak ucuz olan bir malzemenin yüzeyini daha iyi yüzey özelliklerine sahip bir tabaka ile kaplayıp malzemenin yüzey özelliklerini arttırmaktır. Bu işlem boyunca istenmeyen bazı problemler meydana gelebilir. Bu problemlerin en yaygın olanları şunlardır:

- Temel malzeme ile kaplama tabakası arasında zayıf bir erime bağı oluşması
- Gözeneklilik olayının meydana gelmesi
- Yüksek ısı girişinden dolayı malzemede meydana gelen termal çarpıklık
- Alt tabaka ile uygulanan kaplama tabakasının karışımı yani aşırı seyreklik
- Örnek üzerine kaplama tabakasının uygulanmasında lokal yetersizlikler

Lazer kaplama tekniği, düşük ısı girişinden dolayı malzemede meydana gelen termal çarpıklığın düşük olması, daha iyi mikro yapıya sahip kaplama tabakaları meydana getirmesi ve seyrekliğin kontrol edilebilmesinden dolayı bu sorunların üstesinden gelebilen tekniklerden bir tanesidir. Lazer kaplama, yüzey özellikleri iyi olmayan bir alt tabaka üzerine daha üstün özelliklere sahip başka bir malzemeyi aralarında metalurjik bir bağ oluşturacak şekilde eriterek alt tabaka üzerine yapıştırma işlemidir. Bu işlem için kaplama malzemesi olarak tel, tabaka ve tozun uygulanması gibi birkaç

metot vardır. Fakat en yaygın olarak kullanılan metot toz enjeksiyonu ile kaplama metodudur. Bu metot 2 şekilde gerçekleştirilebilir. Birinci metot işlem boyunca toz enjektörde edilmesiyle gerçekleştirilir. İkinci metot ise tozun önceden serilmesiyle gerçekleştirilir [8,10].

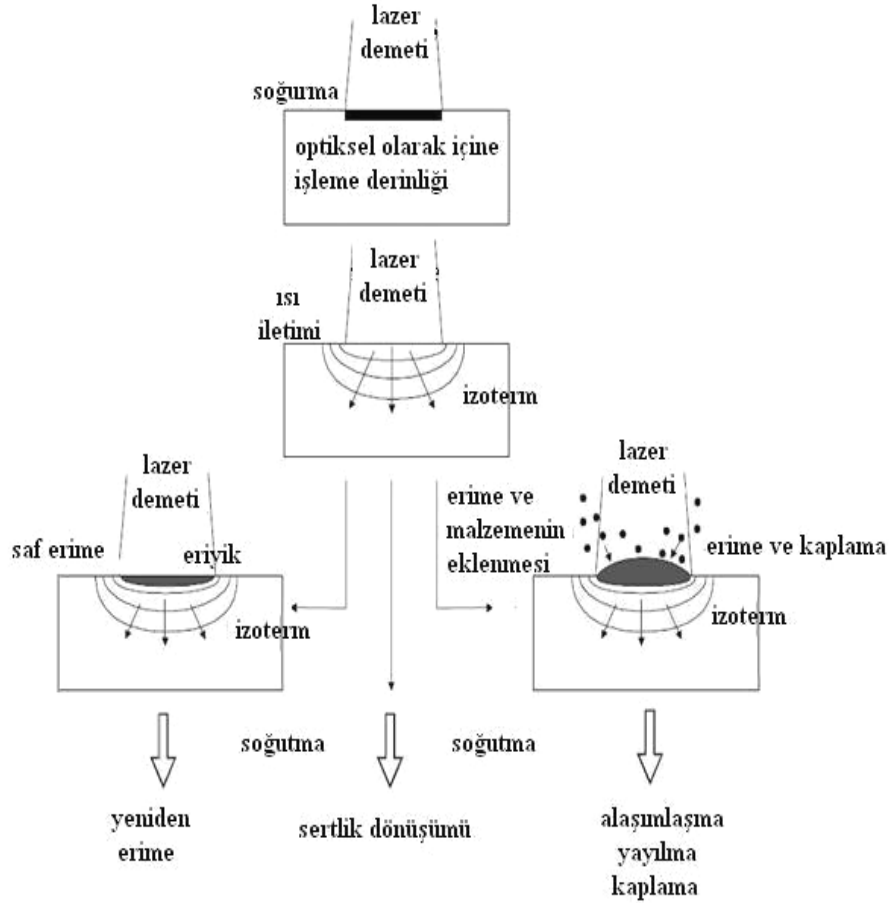
Önceden serilmiş toz ile kaplama yapılırken lazer ışığı önce toz ile temas edeceği için eriyik havuzu tozun üstünde oluşmaya başlar ve aşağıya alt tabakaya doğru ilerler. Alt tabaka erimeye başlayıp kaplama malzemesi ile bir erime bağı oluşturmaya başladığı zaman kaplama tabakası oluşmuş olur. Kaplama işlemi boyunca tozun uygulanması metodunda ise önce alt tabakada bir eriyik havuzu oluşumu ile toz enjeksiyonu başladığından dolayı kaplama tabakası bir anda oluşur [8,10].

Lazer kaplama işlemi için yüksek güçteki Nd: YAG ve CO₂ lazerleri kullanılır. Bu lazerler atımlı ve sürekli olmak üzere iki şekilde kullanılabilirler. Ancak atımlı lazerlerde örneğe iki atım arasında ısı girişi olmadığından dolayı örnekte çatlaklar, aşırı seyreklik ve termal çarpıklık gibi istenmeyen olayların meydana gelme olasılığı sürekli bir lazer kullanıldığında meydana gelme olasılığından daha azdır. Ayrıca eriyik havuzunun soğuması ve bunun sonucunda katılaşma süreci daha hızlı olacağından mikro yapı, daha ince ve daha dayanıklı olur. Bu sebepten dolayı atımlı lazer kullanmak sürekli bir lazer kullanmaktan daha avantajlıdır [10].

3.1. Lazer Yüzey İşlemlerinin Süreçleri

Bir örnek yüzeyine hareketli bir lazer demeti uygulandığı zaman yüzey bu demeti absorbe eder ve yüzey ısısı artar. Daha sonra bu ısı örnek malzemenin yüzeyinden aşağıya doğru yayılır ve soğuk hacim tarafından söndürülür. Hareketli lazer kaynağı tarafından meydana getirilen termal devirden dolayı örnek yüzey tabakasının mikro yapısında değişiklik meydana gelir. Yüzey soğuduğu zaman önceki yapısından daha sert bir yapıya sahip olur. Isınmış bu yüzey üzerine lazer demeti uygulanmaya devam edilirse örnek yüzeyinde saf eriyik meydana gelir. Bu işleme devam edilir ve

malzeme eklenirse kaplama meydana gelir. Lazer yüzey işlemlerini süreçlerine göre erimesiz, yüzeyin erimesi, yüzeyin ve eklenen malzemenin erimesi şeklinde 3 gruba ayırabiliriz [8].



Şekil 3.1: Yüzey sıcaklığına ve eklenen malzemeye göre lazer yüzey işlemleri [8].

3.2. Kullanım Alanları

Lazer kaplama, malzemelerin yüzeylerini sertleştirmek ve yüzey özelliklerini artırarak malzemenin aşınmaya ve paslanmaya karşı daha dayanıklı olmasını sağlamak için kullanılan çok yaygın bir tekniktir. Lazer kaplama, yüksek ısıtma ve soğutma oranları ile termal devir, aşındırıcı gazlar, yüksek sıcaklıklar ve aşındırıcı parçacıklar gibi malzemenin yüzeyine zarar verebilecek ortamlara maruz kalan mekanik parçaların üzerine uygulanması, uzay, madencilik, otomotiv, kimyasal

depolama, nükleer güç istasyonları ve reaktör tankları gibi birçok endüstri alanında kullanılmaktadır [8,9,10,11].

Tablo 3.1: Lazer kaplamanın bazı endüstriyel uygulamaları.

Kaynak	Parça	Kaplama Malzemesi
Ni Alaşımı (C276)	paslanmaz çelik	[11]
Triballoy on Nimonic	yüksek basınç gaz türbin bıçak kaplanması	[12]
Stellite, Triballoy T-800	otomotiv parçalar	[13]
Stellite, Colmonoy	uzay	[13]
Stellite 6, Stellite SF	türbin bıçağı	[13]
Stellite 6	türbin bıçağı, saban bıçağı	[14]
Stellite 6	dizel motor supabı	[15]
Stellite 6	deformasyona uğrayan alet	[16]
Stellite 6	paslanmaz çelik seal runner	[17]
Stellite6, F	buhar türbin bıçağının ön kenarı	[18]
Stellite6, F	supaplar	[19]
Stellite 21	yanmalı motorun içindeki supap (X45CrSi9)	[20]
Ni-Cr Alaşımı	kompresör bıçağı (Ti-6Al-4V)	[21]
PWA Alaşımı 694	nükleer supap (AISI 304)	[22]
Stellite 6, Colmonoy 5	jet motor türbin bıçak ağzı	[23]
Inconel 713 (Ni Temelli Süper Alaşım)	uzay malzemeleri	[24]
Stellite 6L	türbin bıçağı	[25]
Ti6242 Alaşımı	hasar gören pervane bıçakları	[26]

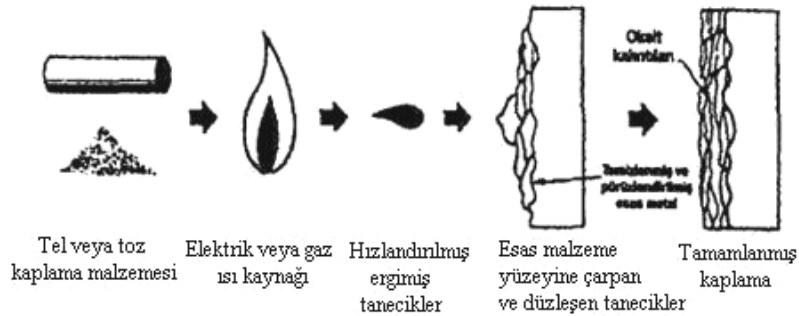
3.3. Kaplama Yöntemleri

Metal yüzeyleri daha dayanıklı hale getirmek için birkaç termal yüzey işlemi vardır. Bu termal yüzey işlemlerini alevle püskürtme, elektrik arkı ile püskürtme ve plazma ile püskürtme olarak sıralayabiliriz.

Bu yöntemler kaplama malzemesi ve ısı kaynağı kullanımına bağlı olarak farklılık gösterebilirler. Genelde kaplama malzemesi olarak tel, çubuk ve toz kullanımı oldukça yaygındır. Fakat en yaygın kullanılan yöntem tozun uygulanmasıdır [8]. Kullanılan kaplama malzemesini eriterek yüzeye yapıştırmak için kullanılan ısı püskürtme tabancasındaki gerekli sıcaklığı elde etmek amacı ile yanıcı gazlar, elektrik arkı ve plazma arkı kullanılır [27]. Burada, alev ile püskürtme ve elektrik arkı ile püskürtme düşük enerjili püskürtme sistemlerine girerken plazma arkı ile püskürtme yüksek enerjili püskürtme sistemlerine girer [28].

3.3.1. Alev püskürtme ile kaplama

Bu yöntemde ısı kaynağında gerekli sıcaklığı elde etmek için yanıcı gazlar kullanılır. Genel olarak kullanılan gaz asetilendir. Fakat kullanılan kaplama malzemesine göre erime sıcaklığı değiştiğinden dolayı bazen düşük sıcaklıklardaki malzemeler için propan kullanılır. Kaplama malzemesi olarak ince toz kullanıldığında zaman ise hidrojen gazı kullanılmaktadır [27].



Şekil 3.2: Isıl püskürtme işlem sırası [29].

3.3.2. Elektrik arkı ile kaplama

Ark sprej sistemi eş zamanlı ve sürekli bir şekilde iki metal telin aynı hız oranıyla besleyen ekipmandan oluşur. + ve – olarak iki farklı kutup ‘a bağlı iki metal tel temas ettiği zaman bir elektrik arkı meydana gelir. 4000 °C ‘yi bulan arc sıcaklığı ile teller hızlı bir şekilde ergir ve basınçlı gaz tarafından parçacıklar halinde yüzeye püskürtülür. Parçaların, metal ve metal alaşımları ile kaplanmasında yaygın olarak kullanılan ve Püskürtme Galvaniz olarak adlandırılan bu yöntemin amacı malzemeleri aşınma ve paslanmaya karşı daha dayanıklı hale getirmektir [30,31].

3.3.2.1. Elektrik ark sprej sistemi

Bu teknikte mekanik parçaların aşınmaya, oksitlenmeye ve korozyona karşı dirençli olması, pürüzsüz bir yüzeye sahip olması, daha iyi elektrik ve ısı iletkenliğine sahip olması ve hasar görmüş parçaların onarılması gibi birçok endüstriyel probleme çözüm aranır. Ark sprej sistemi, püskürtme tabancası, güç ünitesi, tel besleme ünitesi ve kontrol ünitesi olmak üzere 4 üniteden oluşur [31,32].

3.3.2.2. Ark sprejin avantajları

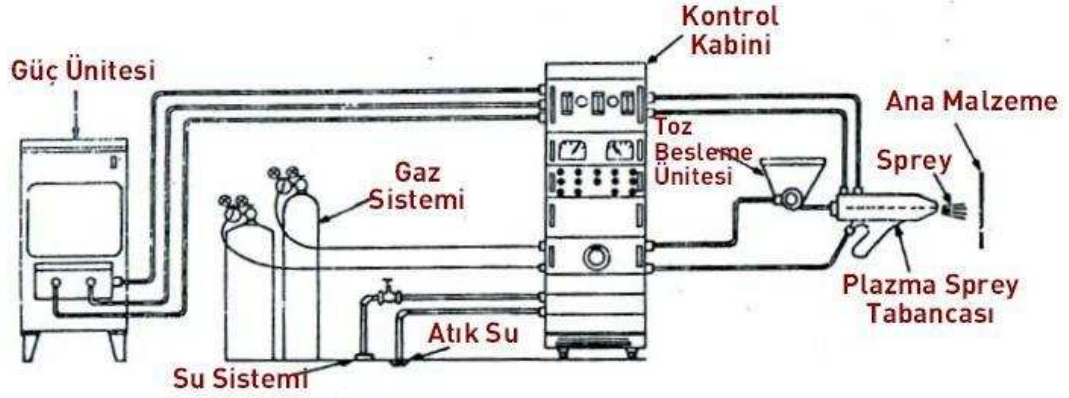
- Geniş yüzeyleri kaplamak için kullanıldığında düşük maliyetli bir prosestir.
- Kaplama yapılırken alt malzemeye düşük ısı girişi olduğundan dolayı malzeme zarar görmez ve dolayısı ile örnekte termal çarpıklık meydana gelmez.
- Su ve hava ile temas eden sökölmesi ve taşınması pratik olmayan metal parçaların yerinde kaplanması için olanak sağlar.
- Daldırma galvanizleme ve epoksi boya ile koruma uygulamalarına göre 6-7 kat daha fazla kullanım ömrü sağlar [30].

3.3.2.3. Endüstriyel uygulamalar

Sanayide birçok alanda kullanılan ark sprey, parçaların yüzeylerini sertleştirmede, maruz kaldıkları ortamların sebep olacağı yorulma, aşınma ve paslanmaya karşı direncini arttırmada kullanılırlar. Bu yöntemin uygulandığı mekanik parçalara örnek olarak, pompa pistonları, krank şaft muyluları, kam milleri, aşınma bilezikleri, kâğıt silindirleri, baskı merdaneleri, çekme silindirleri, frenleme plakaları, sabit ve kayıcı yataklar, kazan borularını verebiliriz. Ayrıca kalın kaplama olarak bilinen plastik enjeksiyon kalıplarından ince kaplama olarak bilinen elektrik devrelerine kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir [30,31].

3.3.3. Plazma püskürtme ile kaplama

Plazma, iyi elektrik ve ısı geçirgenliğine sahip olan ve içerisinde iyon, elektron, nötr atom veya molekül, uyarılmış atom veya molekül ve foton bulunduran iyonize olmuş gaz anlamına gelmektedir [28]. Plazma gazı olarak argon, hidrojen ve azot gibi gazlar kullanılır. Bu gazlar ısı yöntemlerinde kullanılan püskürtme tabancasının içerisindeki güçlü elektrik arkından geçirilerek iyonize edilirler. Bu iyonize olmuş gaz plazma alevi olarak adlandırılır ve sıcaklığı yaklaşık 10000 ° C civarındadır. Bu sıcaklık değeri eritilmesi zor olan tozları bile çok rahat bir şekilde eriterek alt tabakaya yapışmasını sağlar. Bu yöntemde seramikler, karbürler, metal ve metal alaşımları gibi tozlar kullanılır. Plazma püskürtme sistemi güç ünitesi, gaz ünitesi, toz besleme ünitesi, soğutma ünitesi, püskürtme tabancası ve kontrol ünitesi gibi bileşenlerden oluşmaktadır [26]. Bu sistem şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Plazma ile püskürtme prensip şeması [28].

3.3.3.1. Endüstriyel uygulamalar

Sanayide kullanılan ısı püskürtme yöntemlerinden biri olan plazma ile püskürtme metodu iplik kılavuzları, çekme silindirleri, germe silindirleri, yivli silindirler, kılavuz makaralar, pompa şaftları ve kovanları, pompa pistonları, mekanik salmastralar, baskı merdaneleri, şaft kovanları, vanalar, asidik ve bazik ortamlar, ısıtıcı tüp elektrik yalıtımı gibi geniş uygulama alanlarına sahiptir [33].

3.4. Lazer Kaplama Yönteminin Klasik Metotlardan Üstünlükleri

Lazer kaplama yöntemi, ısı kaplama tekniklerinden biridir. Klasik kaplama yöntemlerinde kullanılan ısı kaynaklarından dolayı bazı problemler meydana gelebilir. Bu yöntemde ısı kaynağı olarak lazer demeti kullanıldığından dolayı diğer yöntemlere göre biraz daha fazla avantaja sahiptir.

- Enerji miktarının daha kontrollü olması
- Çok lokal işlemlere olanak sağlaması
- Toplam ısı girişi diğer yöntemlere göre daha az olduğundan dolayı maddede meydana gelebilecek termal çarpıklığın en az olması

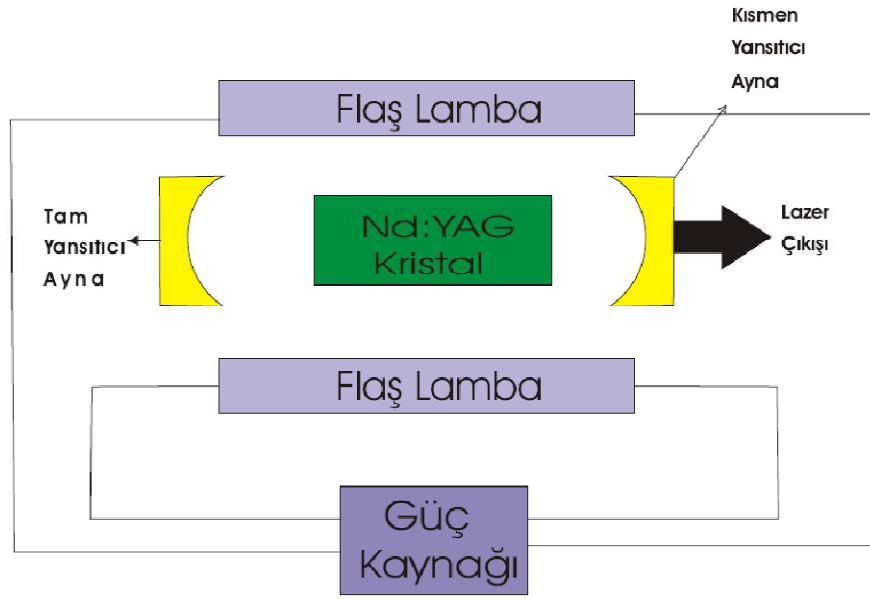
- Isıtma ve soğutma oranlarının yüksek olmasından dolayı oluşan kaplamanın mikro yapısının daha ince ve kaliteli olması
- Kaplama işlemi boyunca herhangi bir temas olmadığından dolayı ne alette nede örnekte mekaniksel bir aşınma meydana gelmemesi
- Kaplama tabakası – alt tabaka ara yüzü ve tüm hacimde gözeneklilik olayının ve çatlakların daha az oluşmasından dolayı aşınmaya karşı daha çok koruma sağlaması
- İşlem derinliğinin iyi tanımlanması

Bu avantajlara ek olarak kaplama tabakası tarafından seyrekliğin kontrol edilebiliyor olması ve kaplama tabakası ile alt tabaka arasında güçlü bir erime bağının oluşturulabiliyor olması lazer kaplama yönteminin az bulunur avantajlarından biridir.

3.5. Lazer Kaplamada Kullanılan Lazerler

3.5.1. Nd:YAG lazeri

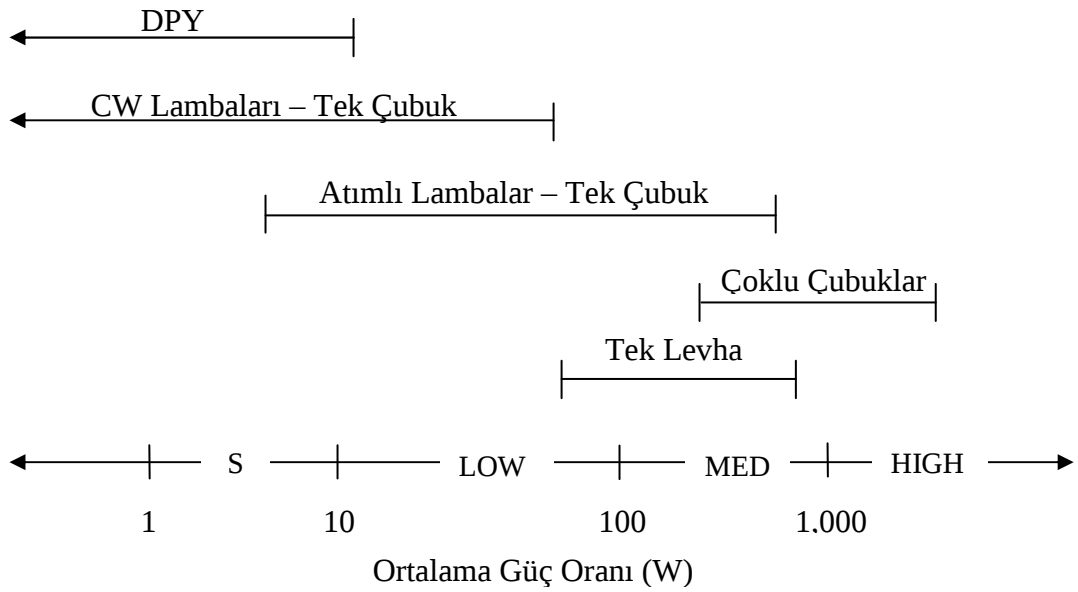
Sanayide kullanım alanı bir hayli fazla olan Nd:YAG lazeri yüksek güçte lazer çıkış gücü üretmeye yetenekli olup 4 seviyeli bir lazer sistemine sahiptir. Nd:YAG lazeri, yttrium alumina garnet (YAG – $Y_2Al_5O_7$) kristaline sahip olup IR bölgesinde ve 1064 nm de lazer ışığı üretir. Yüksek ısı iletkenliğine sahip YAG kristalinde temel uyarıcı Neodinium (Nd^{+3}) olup yttrium'un % 1'lik kısmının yerini alarak kristalin ısıma yapmasına neden olur. Isı iletkenliğinin yüksek olmasından dolayı sürekli modda çalıştığında birkaç yüz wattlara, atımlı modda çalıştığı zaman ise 1 kW'lık güce kadar ulaşabilir. Fakat kristal boyutu yaklaşık olarak 0.1 m uzunluğunda ve 12 mm çapında sınırlı olduğu için lazerin güç ve enerji çıkış kabiliyeti sınırlıdır. Nd:YAG kristalinde uyarıcı maddenin yoğunluğu tipik olarak % 0.725 oranındadır. Yani yaklaşık olarak metre küpe 1.4×10^{26} tane atom düşmektedir. Klasik bir Nd:YAG lazeri Şekil 2.6 da gösterilmiştir [1,5,34].



Şekil 3.4: Klasik bir Nd:YAG lazeri.

3.5.1.1. Demet gücü

Aşağıdaki şekilde tek – rod, çoklu – rod ve tek – levha rezonatörler tarafından üretilenler lazer demetleri için ortalama güç oranlarının aralığını gösterir.



Şekil 3.5: Ortalama demet güç aralığı [34].

Yukarıda gösterildiği gibi YAG lazerlerinin uyarılması için 3 farklı optik kaynak vardır. Bunlar CW lambalar, atımlı lambalar ve lazer diyotlarıdır. Ek olarak, atım üretmek için teknikler vardır ki bunlardan bir tanesi optik rezonatörün iç anahtarlanmasıdır. Bu olay atım çıkış genişliğini büyük oranda etkiler [34].

3.5.1.2. Uygulama alanları

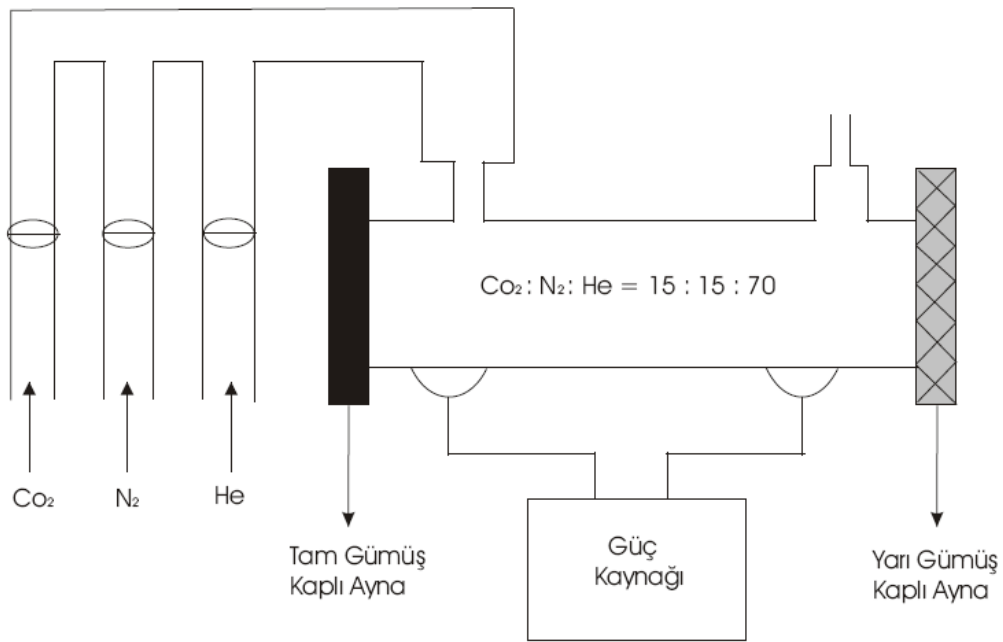
Atımlı ve sürekli olmak üzere iki farklı modda çalışabilme yeteneğine sahip olan Nd:YAG lazeri tıptan sanayiye, askeriyeden oyuncak sektörüne kadar bir çok alanda kullanılmaktadır. Bazı kullanım alanları aşağıda sıralanmıştır.

1. Nd:YAG lazeri kaynak, delme, kesme, yüzey sertleştirme ve kaplama gibi malzeme işlemede kullanılır.
2. Askeriyede mesafe bulucular ve hedef belirleyicilerde kullanılır.
3. Q – anahtarlı lazerler bilimsel uygulamalarda 2.harmonik ($\lambda = 532 \text{ nm}$), 3. harmonik ($\lambda = 355 \text{ nm}$) ve 4.harmonik ($\lambda = 266 \text{ nm}$) ile kullanılır.
4. Tıbbi uygulamalarda, ince zar kesimi (katarakt cerrahi), safra-sidik torbası cerrahisi gibi uygulamaları vardır. Lazer enerjisini uygun bölgeye taşıyabilmek için kullanılan düşük kayıplı optik fiber sistemi cerrahinin birçok alanında kullanımını avantajlı hale getirir.
5. Askeriyede menzil bulmak ve hedef belirlemek gibi uygulamalara sahiptir.
6. Yüksek güçteki atımlı versiyonları, katı bir hedef üzerine odaklanan lazer ile X – ray üretimi için kullanılır ve burada yüksek sıcaklıkta bir plazma meydana gelir ki bu plazma x – ışını ve katı – x – ışını bölgesi içinde ışık yayar.

3.5.2. Karbondioksit lazeri

Karbondioksit lazeri en güçlü ve en verimli lazerlerden biridir. CO₂ lazeri 10,6 μm ve 9,4 μm dalga boyu bölgelerinde dönme – titreşim geçişleri üzerinde orta kızılötesi bölgesinde çalışır. Atımlı ve sürekli lazer çıkışının her ikisi de karbondioksit, nitrojen

ve helyum gazlarının bir karışımında gaz boşalımının farklı birkaç tipi içinde meydana gelir. Bu optik alet sürekli olarak 10 kW 'ın üstünde çıkış gücü ve ayrıca aşırı derecede yüksek güçte atım üretmeye yeteneklidir. Karbondioksit lazer yaklaşık 2,5 cm 'lık bir genişlikte ve 5 cm uzunluğundaki bir boşaltım tüpünden meydana gelir [1]. Tüpün her iki ucunda optik düzlem ve optik aynalarla kapalıdır. Bu aynalardan bir tanesi yarı gümüş kaplı (kısmen yansıtıcı) diğeri ise tam gümüş kaplıdır (tam yansıtıcı).



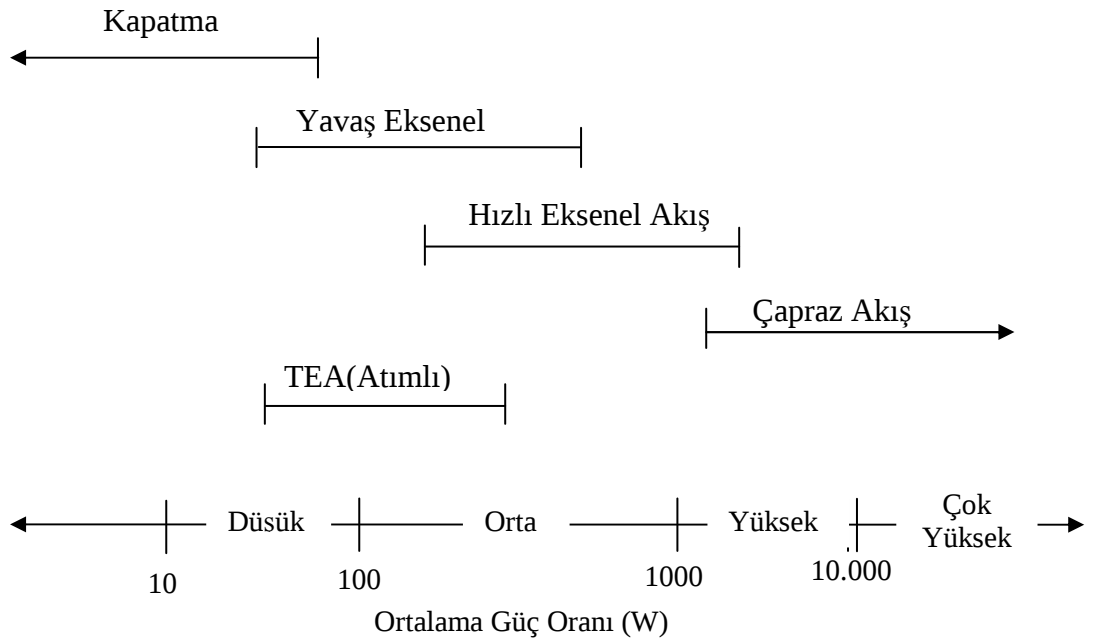
Şekil 3.6: Tipik bir karbondioksit lazeri.

Karbondioksit gaz lazerinin karışım içeriği birkaç mm Hg 'lık bir basınçta % 15 CO₂, % 15 N₂ ve % 70 He 'dır. Bu karışım boşaltım tüpünün ucuna bağlandığında ilmiklerin içinden akarak boşaltım tüpünü besler. Elektrik boşalmı üretmek için dc, uyarıcı kaynak olarak kullanılır. Başlangıçta nitrojen molekülleri boşaltım tüpüne girer ve bu moleküller elektronlar ile çarpışarak uyarılırlar. O zaman uyarılmış nitrojen molekülleri rezonans kavitesinin bütün hacmine yayılır ve uyarılmamış CO₂ molekülleri ile çarpışırlar. Böylece istenilen enerji seviyesine enerjilerini transfer ederler.

Salınımlar karbondioksitin 2 titreşim seviyesi arasında yer alırken nitrojen (N_2) ve helyum (He) lazer hareketinin verimini geliştirir. Nitrojen üst seviyede geniş bir nüfus üretilmesine yardım ederken helyum daha düşük seviyeden nüfusun taşınmasına yardım eder. Yayılan fotonlar aynalar arasında geri ileri seyahat eder ve daha da büyürler. Bu lazer hareketinin sonunda çıkan lazer ışığı çeşitli infrared frekanslarında olup görünür bölgede değildir. Örneğin, uzak infrared bölgesinde 10,6 μm de ışık saçar [1].

3.5.2.1. Demet gücü

Her teknoloji kategorisinde üretilmiş ürünler için ortalama güç oranlarının aralığı aşağıda Şekil 3.7’de gösterilmiştir:



Şekil 3.7: Farklı yöntemlerle üretilen demetlerin güç bölgesi [34].

İlk dört teknoloji hem atımlı hem de sürekli kipte çalışabilir ama TEA lazer sadece atımlı olarak çalışabilir.

3.5.2.2. Demet kalitesi

Düşük ve orta güçteki CO₂ lazerleri, kararlı rezonatörler ile en çok dizayn edilen ve en düşük düzen TEM₀₀ gaussian mod da çalışma yeteneğine sahip lazerlerdir. Bu lazerler 1 TDL 'ye yakın bir demet kalitesine sahiptir. Bazı uygulamalar düşük düzen modlarının bir kombinasyonunu gerektirir ve bu durum istenilen modların çapı ile boşalım çapının karşılaştırılmasıyla(uyumuyla) başarılıdır. Ayrıca modlar, optik kavite içindeki ortalama güç tarafından ihmal edilebilir derecede etkilenir. Yani demet kalitesi ortalama lazer gücünden bağımsızdır. Süper yüksek güç elde etmek için kararsız rezonatör teknikleri geliştirilmiştir. Yaklaşık 2000 W 'ın üstündeki böyle lazerler için demet kalitesinin tipik aralığı 1 ile 5 TDL arasındadır [34].

3.6. Lazer Kaplamada Kullanılan Tozlar

Lazer kaplama yönteminde iyi bir kaplama elde etmek için, kaplama tabakası ile alt tabaka arasındaki tüm ara yüz boyunca güçlü bir erime bağı elde etmek en gerekli durumdur. Ancak burada kaliteli kaplama elde etmeye engel olabilecek bir olay söz konusudur. Dikkat edilmesi gereken bu olay alt tabaka ile kaplama malzemesi arasında karışımın meydana gelmesidir [8]. Ayrıca kaplamaların kalitesi, kullanılan tozların tane boyutuna, şekline, morfolojisine ve kimyasal bileşimine bağlıdır.

Metal ve metal matrisli karışımlar aşınmaya ve paslanmaya karşı yüksek koruma sağladıkları ve yüzeyin sertliğini önemli ölçüde arttırdıkları için iyi bilinen ve çok kullanılan tozlardır [35]. Bu karışımlar dışında plastikler, seramikler ve karbürler de kaplama malzemesi olarak kullanılırlar. Alt tabaka ve kaplama malzemesi seçilirken aralarında bir faz dengesi olup olmaması önemlidir. Örneğin alüminyum ve kobalt birbirleri içerisinde eriyemezler yani bir faz dengesi yoktur. Kullanılacak olan alt tabakaları 2 temel başlık altında sınıflandırabiliriz. Birinci başlık altında tüm çelikleri ikinci başlık altında ise alüminyum ve titanyum gibi demirsiz materyalleri toplayabiliriz [8]. Kaplama malzemesi olarak kullanılabilecek tozları demir esaslı

süper alaşımlar, nikel esaslı süper alaşımlar, kobalt esaslı süper alaşımlar ve son olarak titanyum ve titanyum alaşımları şeklinde 4 başlık altında toplayabiliriz.

3.6.1. Bir çelik alt tabakası üzerine uygulanan tozlar

3.6.1.1. Kobalt esaslı tozlar (Stellites)

Ergime sıcaklıklarının yakın olması ve yüksek sıcaklıklardaki atomik yapılarının aynı özellikte olmasından dolayı kobalt ile nikel birbiriyle karşılaştırılabilirler. Yüksek sıcaklık uygulamalarında kobalt esaslı alaşımlar nikel esaslı alaşımlar ile kıyaslandığı zaman nikel ve nikel-demir alaşımları kadar geniş kullanım alanına sahip değildirler. Fakat daha stabil olmaları ve mikro yapılarındaki borür ve karbür fazlarının oluşumundan dolayı mükemmel dayanıklılık sağlarlar. Yüzey kaplama teknolojisinde kullanışlı olan kobalt esaslı alaşımlar kobalt-krom-tungsten ve kobalt-krom-molibden alaşımları Elwood Haynes tarafından araştırılmıştır [36]. Bu araştırmalar sonucunda Co-Cr alaşımının yüksek dayanıklılık ve paslanmazlık özelliğinin olduğunu ve ayrıca bu alaşıma tungsten ve molibden eklenerek alaşımın dayanıklılığının arttığı keşfedilmiştir. Söz konusu olan alaşımın kimyasal kompozisyonu Co-Cr-W-C şeklindedir. Bu alaşımlardan ilk geliştirileni Co, 28Cr, 4W, 1.1C alaşımıdır [37]. Burada karbon alaşıma dayanıklılık ve korozyon direnci sağlar. Ayrıca alaşımda bulunan M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ karbürlerinin oluşmasında rol oynar. Alaşımdaki molibden ve tungsten katıldığında alaşıma ek bir dayanıklılık kazandırırken M_6C karbürünün oluşmasından sorumludurlar. Kobalt, nikel ve demir esaslı alaşımların matrisi içerisinde genellikle Cr, C, Mo, W ve az miktarda silisyum ve mangan bulunmaktadır [8,36,37,38].

3.6.1.2. Nikel esaslı tozlar

Nikel esaslı alaşımlar, yüksek sıcaklığa, zararlı gazlara ve aşındırıcı parçacıklara maruz kalan mekanik parçaları daha dayanıklı hale getirmek için kullanılan toz

grupları arasında en geniş alana sahip olanıdır. Nikel esaslı alaşımların yapısında yaklaşık olarak % 50-70 arasında nikel bulunur. Bu alaşımın kimyasal bileşimi nikel, krom, bor, karbon, silikon ve alüminyum şeklindedir. Alaşımda meydana gelen sert borür ve silisyum karbür sertliği ve aşınmaya karşı korumayı geliştirir ama aynı zamanda bu sert faz kaplamanın kırılgan olmasına sebep olur. Ni-B-Si alaşımına tungstenin ilave edilmesi alaşımı sağlamlaştırmak içindir. Bor ve silikonun ilavesi ıslanabilirlik davranışını geliştirir. Alüminyum eklendiği zaman intermetalik fazlar (NiAl_3 ve Ni_2Al_3) ve oksitler (Al_2O_3) meydana gelir. Bunlar alaşımın sertliğini daha çok artırır. Nikel alaşımlarını Nikel-bakır, Nikel-krom ve Nikel-molibden-krom şeklinde 3 gruba ayırabiliriz. Nikel-bakır alaşımına örnek olarak Monel, Nikel-krom alaşımına örnek olarak Inconel, Waspalloy, Astroloy ve Nikel-molibden-krom alaşımına örnek olarak ise Hastalloy B, Hastalloy C verilebilir [8,35,38,39,40].

3.6.1.3. Demir esaslı alaşımlar

Demir, krom, karbon ve mangan veya tungsten karışımından meydana gelen bu alaşım, içerisinde kobalt esaslı kaplama malzemelerindekiyle aynı türde olan M_7C_3 ve M_6C karbürlerinin oluşması sayesinde aşınmaya karşı iyi bir direnç sağlarlar. Bu alaşıma molibden eklenerek korozyona karşı korunma artırılabilir. Pek çok gaz türbin motorlarında, kanatlarında, diskler ve şaftlar ile buhar türbinlerindeki bazı parçalar demir esaslı süper alaşımlardan yapılabilir. Diğer süper alaşımlarla kıyaslandığı zaman daha ucuz bir malzemedir [8,38,39].

3.6.1.4. Titanyum ve titanyum esaslı alaşımlar

Titanyum ve alaşımları yüksek sıcaklıkta korozyona karşı iyi dayanıklılık gösterdiği ve metallere göre daha hafif olduklarından dolayı endüstriyel uygulamalarda çok tercih edilen bir alaşım haline gelmiştir. Askeri ve sivil havacılık alanında (jet motorları, füzeler, uzay araçları), otomotiv sektöründe, kimya ve petrokimya endüstrisinde, dental ve medikal uygulamalarda, tuzlu suya karşı mükemmel bir koruma sağlamasından dolayı deniz suyundan tatlı su elde edilen tesislerden tuzlu

suya temas eden gemi donanımına kadar son derece yaygın bir kullanım alanına sahip olmaktadır. Titanyum alaşımı saf, alfa fazı, alfa-beta fazı ve beta fazı olmak üzere 4 şekilde bulunmaktadır. α -fazı, saf Ti, Al ve Sn gibi elementlerin karıştırılmasıyla elde edilir. α - β titanyum alaşımları, α fazındaki alaşıma Ta, V, Mo gibi β fazı kararlaştırıcı elementin ilavesi ile oluşmaktadır. Bu elementlerin ilave oranlarının artmasıyla yarı kararlı β fazı oluşur. β faz dönüşümü, β kararlaştırıcı elementlerin ilavesiyle veya malzemenin β fazı dönüşüm sıcaklığına kadar ısıtılıp soğutulmasıyla da elde edilebilir [37,38,40,41,42,43].

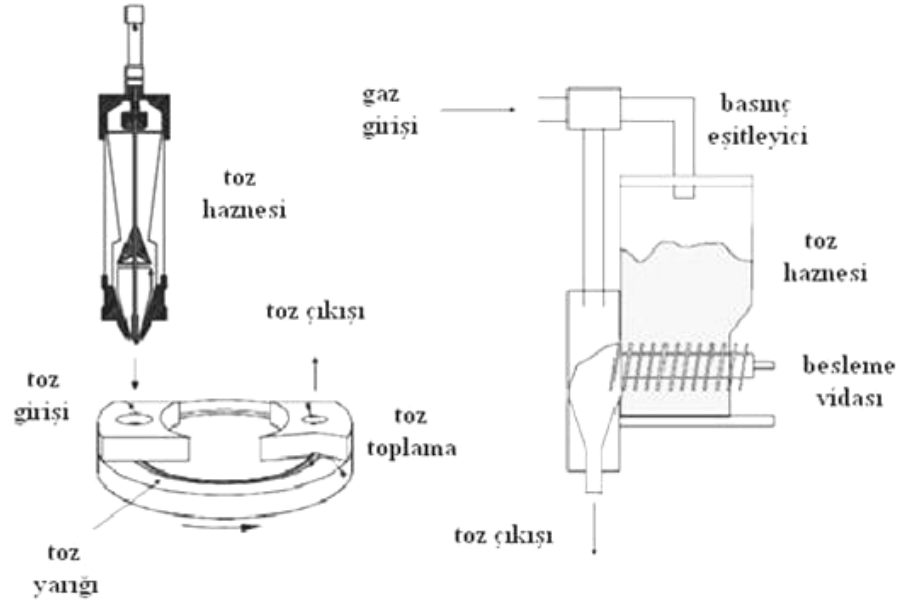
3.7. Kaplamada Kullanılan Besleme Üniteleri ve Nozullar

Kaplama malzemesini eriyik havuzuna homojen bir şekilde uygulamak kaplamanın kalitesini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Bu sebepten dolayı kaplama malzemesini homojen bir şekilde uygulamak için 2 sisteme ihtiyaç duyulur. Bunlardan bir tanesi besleme ünitesi diğeri ise nozuldur.

3.7.1. Kaplamada kullanılan besleme üniteleri

Kaplama malzemesi olarak tel veya tozun kullanılmasıyla bu uygulamayı 2 yöntemle gerçekleştirilebiliriz. Tel uygulamasında, telin eriyik havuzu içerisine doğru bir şekilde uygulanmasını sağlamak için tel besleyici nozulun işlem yüzeyine çok yakın olması gerekir. Bununla birlikte işlenecek parçanın eğik bir şekle sahip olması ve parçanın yüzeyinde içbükey bölgelerin var olması işlemin uygulanmasını zorlaştırır. Bu nedenle işlemi kontrol etmek bir hayli zor olduğundan dolayı genellikle alt tabakada yüksek seyreklik meydana getirir. Zor şekillerin kaplanması, kaplama boyutunun işlem anında değiştirilebilmesi ve seyrekliğin kontrol edilebiliyor olması toz enjeksiyon yöntemini ön plana çıkarmaktadır. Ayrıca kaplama malzemesi olarak kullanılan tozun tel kullanımına göre daha fazla element ve alaşımlara sahip olması toz uygulamasının diğeri bir avantajıdır. Toz uygulamasında tozun örnek yüzeyine taşınması toz besleme ünitesiyle sağlanır. Çeşitli prensiplerde çalışan toz besleme

üniteleri mevcuttur. Örnek vermek gerekirse farklı prensipte olan 2 toz besleme ünitesinin çalışma prensipleri şekil 3.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Farklı iki toz besleme ünitesi [8].

Prensiplerin bir tanesinde, toz haznesinde bulunan toz döner bir diskin deliklerinden yer çekimi vasıtasıyla emme ünitesine akar ve buradan bir taşıyıcı gaz ile nozula sonra oradan da lazer demetinin altına taşınır.

Öteki prensipte ise besleme ünitesi, bir toz konteynırı, basınçlı eşitleyici gaz ve pnömatik bir vidadan oluşmaktadır. Bu prensipte toz konteynırına basıncı desteklemesi için yukarıdan gaz verilirken alt tarafta da vidanın boyutuna ve dönme hızına bağlı olarak tozun besleme oranı ayarlanır.

3.7.2. Kaplamada kullanılan nozullar

Lazer kaplama işleminde kaplama tozunun toz besleme ünitesinden lazer tarafından oluşturulan eriyik havuzuna homojen bir şekilde taşıyabilmek için nozul gereklidir. Kullanılacak nozul kontrol edilebilir olmalı ve ayrıca kaplama yapılacak daha

kompleks parçaların şekline göre kullanılacak nozul ucu kolay değiştirilebilir olmalıdır. Bunlara ek olarak toz odağı, karmaşık şekillerin kaplanması kaplama kafasının eğimli ve hareketli olmasına rağmen bu durumdan etkilenmemelidir. Yani tozun odağı lazerin hareket yönünden bağımsız olmalıdır [45].

Lazer kaplama işleminde kullanılan farklı şekillerde nozullar mevcuttur ancak uygulama olarak 2 temel prensipte çalışırlar. Bir tanesi coaxial (eş merkezli) diğeri ise lateral (yandan) beslemelidir. Eş merkezli nozullarda toz nozulun içerisine geldikten sonra lazer demeti etrafında homojen bir gaz-toz bulutu oluşturur. Daha sonra gaz-toz bulutunun akışı halka şeklindeki nozul ucundan lazer demeti üzerine odaklanarak sağlanır. Tozun yandan sağlanması bütün şekillerdeki parçaların kaplanmasına olanak sağlar. Temel olarak yandan beslemeli nozullar uygun uzunluğa, şekle ve çapa sahip borulardır [8,45].

3.8. Lazer Kaplamada İşlemi Etkileyen Parametreler

Lazer ile kaplama yönteminde çalışılacak olan malzemeye giren ısı daha az olduğu için malzemede bir hasar meydana gelmez ve ayrıca kaplama kalitesinin en önemli parametrelerinden biri olan seyreklik (dilution) diğer yöntemlere göre daha rahat kontrol edilir. Bu nedenle lazer kaplama yöntemi ile daha kaliteli kaplamalar elde etmek mümkündür. Bu yöntemde kaplama yüksekliği ve seyreklik parametreleri oldukça büyük önem taşır. Bu parametreler lazer gücü, toz kütle akış oranı, tarama oranı ve kullanılan alt tabaka ile tozun türü tarafından kontrol edilir [3]. Ayrıca bir kaplamanın kaliteli olması için seyreklik ve gözeneklilik miktarının düşük olması gerekmektedir [8,9]. Her parametrenin kaplama yüksekliğini ve seyrekliğini nasıl etkilediğini bulmak için diğer parametreler sabit tutularak belirlenir. Aksi takdirde hangi parametrenin kaplamayı nasıl etkilediği belirlenemez.

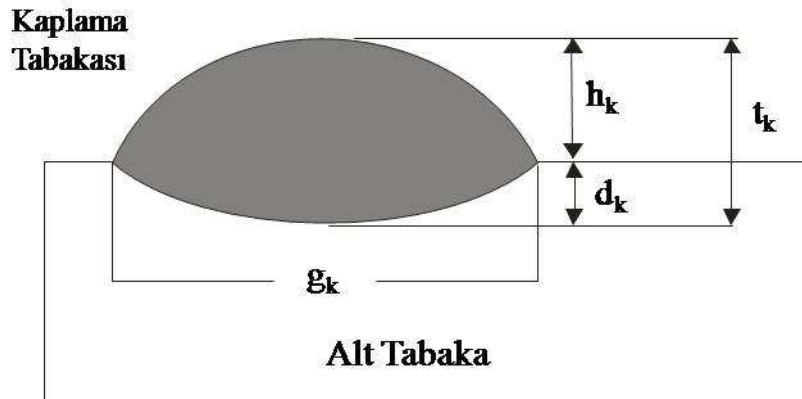
3.8.1. Seyreklik

Lazer kaplama işleminde alt tabaka ile kaplama tabakası arasında güçlü bir erime bağı oluşur. Bu erime bağı elde edilirken alt tabakanın çok ince bir kısmını eritmek, oluşacak olan yüzey tabakasının saflığı için önemlidir. Seyreklik ölçümü 2 metotla ölçülür.

Birinci metotta seyreklik, kaplama tabakasının geometrisinden elde edilerek hesaplanır. Alt tabaka içindeki kaplama tabakasının toplam kaplama tabakasına oranı alınarak seyreklik değeri elde edilir. Şekil 3.9’da tek bir kaplama tabakasının kesit görüntüsü gösterilmektedir. Bu kesitin geometrisinden yararlanarak seyreklik değerinin formülü

$$D = \frac{d_k}{t_k} \quad (3.1)$$

olarak ifade edebiliriz.

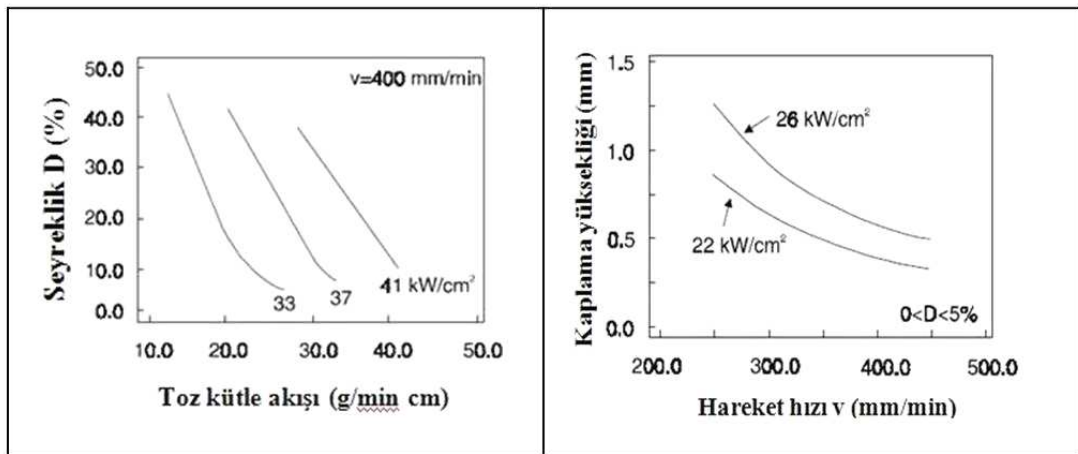


Şekil 3.9: Tek bir kaplama tabakasının kesit görüntüsü.

İkinci metot ise kaplama tabakası içindeki malzeme karışımının analizi yapılarak gerçekleştirilir. Bu metot saf bir kaplama malzemesinin bileşimi ile alt tabanın bileşimi arasında bir karşılaştırma yapılarak kaplama derinliğine karşı seyrekliğin

nasıl değiştiğinin bulunmasını sağlar. Bu metot geometrik yaklaşıma göre daha çok tercih edilir [8].

Kaplama işlemi süresince lazer enerjisi, toz tarafından soğurulan, alt tabaka tarafından soğurulan ve toz ile alt tabaka tarafından yansıtılan şeklinde olmak üzere üç bölüme dağıtılır [46]. Alt tabaka üzerine gelen lazer enerjisi toz tarafından meydana gelen soğurma veya yansımadan sonra geriye kalan zayıflamış enerjidir. Toz tarafından zayıflatılmış enerji direk olarak toz kütle akış oranı ile orantılıdır [47]. Seyreklik, atım enerjisi, toz kütle akış oranı ve hareket hızı tarafından kontrol edilebilir. Toz kütle akış oranının artması ile toz tarafından soğurulan enerji alt tabaka tarafından soğurulan enerjiden daha fazla olacaktır. Buda daha çok tozun erimesine ve alt tabakaya yapışmasına sebep olacağından kaplama yüksekliğinde bir artış meydana gelirken alt tabaka içindeki içine işleme miktarı azalacaktır. Fakat burada toz kütle akış oranına dikkat edilmesi gerekir. Eğer sabit bir atım enerjisinde toz kütle akış oranı çok yüksek olur ise atım enerjisi tozu eritip alt tabakaya yapıştırmak için yetersiz kalabilir. Kaplama yüksekliğinin, işlenecek parçanın hareket hızına göre değişimi ve seyrekliğin toz kütle akış oranına göre değişimi Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

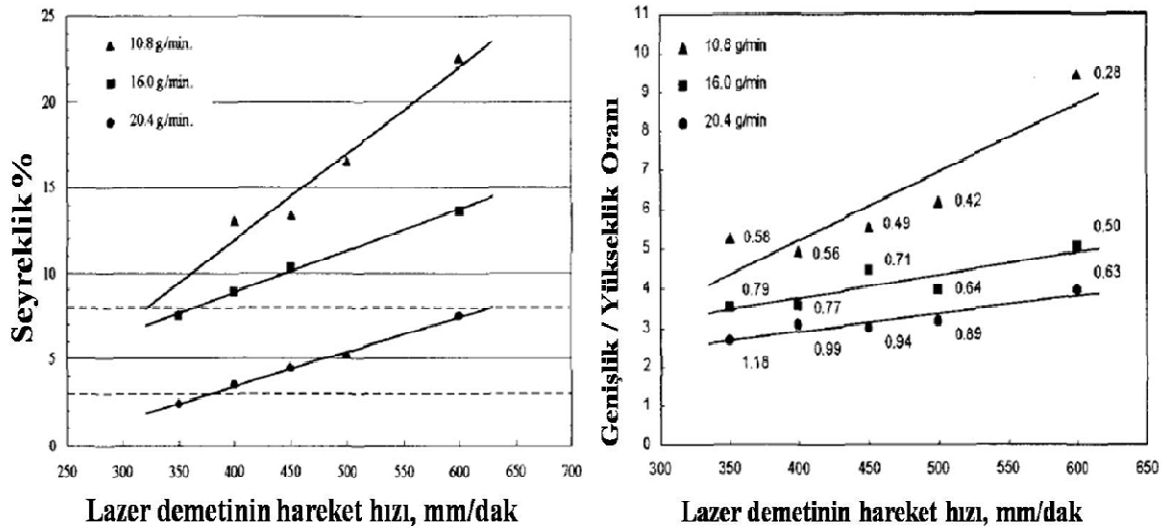


Şekil 3.10: Sayısal bir model sayesinde Stellite 6 ile elde edilmiş lazer kaplamanın işlem diyagramı [48].

Soldaki resim üç farklı güç şiddetinde seyrekliği, toz kütle akışının bir fonksiyonu olarak göstertmedir. Eriyik havuzuna daha çok toz enjekte edildiğinde seyreklik azalmaktadır.

Sağdaki resim ise iki farklı güç şiddetinde % 5 den daha düşük bir seyreklik değerinde elde edilen iyi kalitedeki kaplama tabakalarının kaplama yüksekliğini işlenecek parçanın hareket hızının bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Kaplama yüksekliği işlenecek parçanın hareket hızı(lazer kafasının hızı) ile hemen hemen ters orantılıdır. Hareket hızı arttıkça kaplama yüksekliği düşer [8,49].

Toz kütle akış oranı sabit tutulsa bile lazer demetinin hareket hızı artırıldığında yüzeye eriyip yapışan toz miktarı azalacaktır. Bu sebepten dolayı kaplama yüksekliği düşecektir ve dolayısıyla seyreklik artacaktır. Toz kütle akış oranı üç farklı değerde sabit tutulup lazer demetinin hareket hızının değiştirilmesinin kaplama yüksekliği ve seyreklik üzerindeki etkileri şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11: Lazer demetinin hareket hızının seyreklik ve genişlik/yükseklik oranına etkisi [49].

3.8.2. Gözeneklilik

Gözeneklilik kaplama tabakası içindeki deliklerin var olması olarak tanımlanır. Kaplama işleminde meydana gelen gözeneklilik olayı birkaç şekilde meydana gelmiş olabilir. Kaplama tabakasında bulunan gözenekler, eriyik havuzu katışırken ortamda bulunan gaz baloncuklarından meydana gelebilir. Bu sebepten meydana gelen gözeneklilik olayı işlem sırasında örneğin titreştirilmesiyle en aza indirilebilir. Ayrıca eriyen malzemede ki katılaşmanın farklı yönlerde devam etmesi eriyik içinde bazı bölgelerin etrafının kuşatılmasına sebep olabilir. Bundan dolayı bu bölge üzerinde bir baskı meydana gelecektir ve bu baskı tabaka içerisinde bir gerilme stresine ve hatta gözenekliliğe sebep olabilir.

3.8.3. Atım enerjisi

Atım enerjisi lazer kaplama yönteminin en önemli parametrelerinden biri olup kaplama yüksekliğini ve seyrekliği doğrudan etkiler. Bütün koşullar altında, atım enerjisinin artması ile kaplama yüksekliği artar çünkü her atım başına düşen enerjisinin artmasıyla daha çok toz eritilip alt tabakaya yapıştırılmış olur. Kaplama yüksekliği ayrıca atım enerjisine bağlı olan atım frekansı ve üst üste binme oranının artmasıyla da artar. Ancak düşük enerjilerde atım frekansının ve üst üste binme oranının artması kaplama yüksekliğini önemli ölçüde etkilemez. Daha yüksek atım frekansı ve üst üste binme oranını altında atım enerjisinin artmasıyla kaplama yüksekliğinin artışı daha anlamlı olur. Tablo 3.2’de kaplama yüksekliğinin, kaplama genişliğinin, içine işleme derinliğinin ve seyrekliğin atım frekansının, atım enerjisinin ve üst üste binme oranının farklı değerlerine göre nasıl değiştiğini ve bunun sonucunda kaplamada herhangi bir çatlak meydana gelip gelmediğini göstermektedir [10].

Tablo 3.2: Tek parça kaplamanın metalurjik incelemesinin özeti [10].

Atım Frekansı (Hz)	Üst üste binme oranı (%)	Atım enerjisi (j/atım)	Kaplama genişliği (mm)	Kaplama yüksekliği (μm)	İçine işleme derinliği (μm)	Seyreklik (%)	Çatlak
40	89	25	3.41	125.4	125.1	49.9	Yok
40	89	18	2.86	83.9	110.4	56.8	Yok
40	89	14	2.43	32.0	103.6	76.4	Hafifçe
40	83	25	3.38	62.9	136.8	68.5	Şiddetli
40	83	18	2.89	40.1	124.0	75.6	Orta
40	83	14	2.31	20.2	118.7	85.5	Hafifçe
60	83	25	3.45	79.4	135.4	63.0	Şiddetli
60	83	18	2.85	42.4	122.7	74.3	Şiddetli
60	83	14	2.38	29.5	114.5	79.5	Orta

Kaplama malzemesinin alt tabakanın içine işleme derinliği artan atım enerjisi ve atım frekansı ile artarken, artan üst üste binme oranı ile azalacaktır. Seyrekliğin atım enerjisi ve üst üste binme oranıyla değişimi içine işleme derinliğinkine benzer özellikler göstermekle beraber atım enerjisi arttıkça artar fakat üst üste binme oranı arttıkça azalır. Bununla beraber seyrekliğin değişimi atım frekansı tarafından önemli ölçüde etkilenmez.

Bir kaplama tabakasının genişliği, erimiş toz içerisinde oluşan eriyik havuzunun büyüklüğü hakkında bilgi verir. Lazer spot çapının sabit kalmasına rağmen artan atım enerjisinden dolayı kaplama genişliği artar ve lazer spot çapına daha yakın olur. Ancak kaplama genişliği atım frekansı ve üst üste binme oranından bağımsızdır [10].

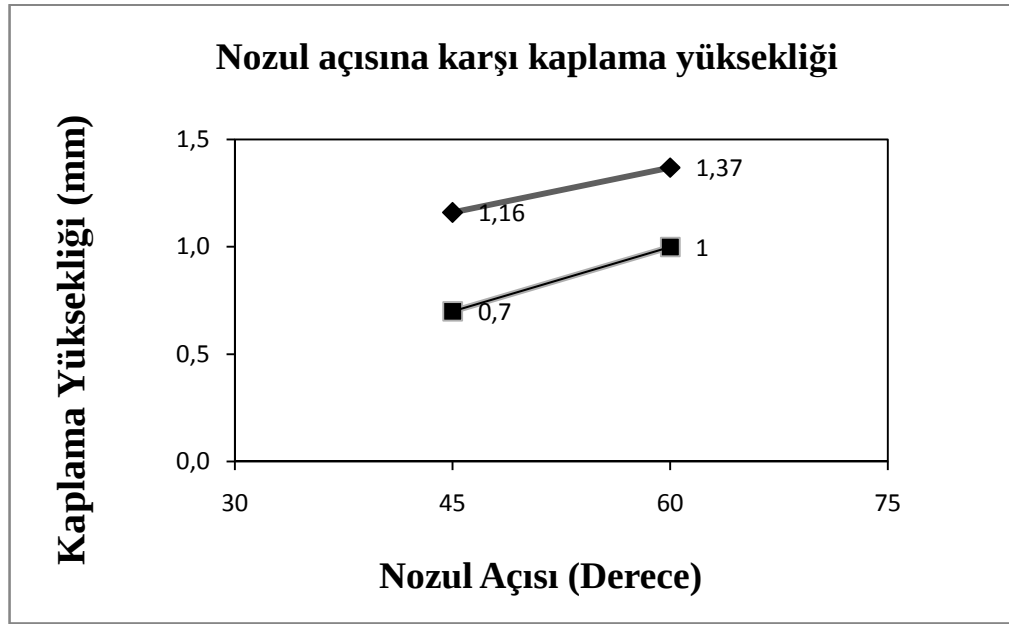
3.8.4. Toz besleme açısının kaplama yüksekliği ve kalitesi üzerindeki etkisi

Toz enjeksiyonu ile yapılan lazer kaplama yöntemi boyunca nozulun açısı kaplama kalitesi ve yüksekliği için önemli bir parametredir. Tablo 3.3 toz besleme açısının kaplama yüksekliği üzerindeki etkisini incelemek için lazer ile yapılmış bazı deneylerin verilerini göstermektedir.

Tablo 3.3: 5A, 5B ve 6A, 6B deneylerinin verileri [50].

No	Güç (kW)	Besleme (rpm)	Nozul Açısı	Kaplama Yüksekliği
5A	2	10	45	0.7 mm
5B	2	10	60	1.0 mm
6A	2.5	10	45	1.16 mm
6B	2.5	10	60	1.37 mm

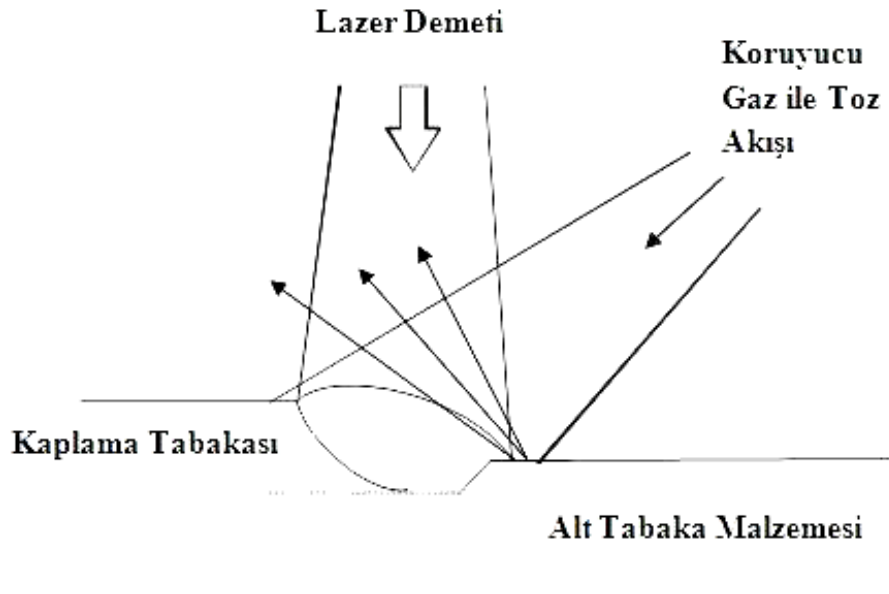
Elde edilen bu kaplama yüksekliklerinin toz besleme açısının bir fonksiyonu olarak gösterimi Şekil 3.12’de ki gibidir.



Şekil 3.12: Kaplama yüksekliklerinin nozul açısının fonksiyonu olarak gösterimi [50].

Şekil 3.12 toz besleme açısının artmasıyla kaplama yüksekliğinin değişimini gösterir. Toz besleme açısının artması kaplama yüksekliğinin artışına sebep olur. Çünkü besleme açısının artması lazer tarafından oluşturulmuş olan eriyik havuzuna daha çok tozun girmesini ve bir an önce erimesini sağlar. Eğer daha yüksek nozul açısı seçilirse daha az ısınmış olan toz parçacıkları eriyik havuzu bölgesinden uzağa hareket etmektedir. Meydana gelen bu olay kaplama tabakasının kalınlığındaki artışa

ayrıca katkıda bulunabilir. Fakat toz besleme açısının artması kaplama tabakasının kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Kaplama tabakasının kalitesi kaplama işlemindeki en önemli faktördür. Bu sebeple besleme açısı 45° de sınırlı olmak zorundadır [43]. Ayrıca toz parçacıkları, ısınmanın başlaması için gerekli lazer enerjisi soğurulana kadar lazer ışığına maruz kalan alt tabakaya çarpıp seker ve sıçrarlar. Bu olayın meydana gelmesi toz verimliliğini çok zayıflatan bir sebeptir. Şekil 3.13 lazer demetini, koruyucu gaz ile birlikte ortama taşınan toz parçacıklarını ve alt tabakadan seken ve sıçrayan parçacıkları göstermektedir [50].



Şekil 3.13: Isınmayı başlatan lazer ışınına maruz kalan alt tabakadan sekmış ve sıçramış parçacıklar [50].

BÖLÜM 4. LAZER İLE YÜZEY KAPLAMA İŞLEMİNDE KULLANILAN DENEY DÜZENEGİ: LAZER SİSTEMİ, ÖLÇÜM SİSTEMİ VE MATERYAL

Bu tez çalışmasında, atımlı JK 760 TR Nd:YAG lazeri kullanılarak $40 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki paslanmaz çelik üzerine Stellite 6 tozu kullanılarak toz enjeksiyon metoduyla lazer kaplama yapılmıştır. Toz enjeksiyonu ile yapılan lazer kaplama işleminde kaplama kalitesini etkileyen birçok parametre vardır. Bunlar atım enerjisi, atım frekansı, üst üste binme oranı, toz kütle akış oranı, seyreklik, lazer demetinin hareket hızıdır. Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan lazer, tasarlanan deneysel düzenek ve lazer kaplama işlemini ve kalitesini etkileyen parametreler belirlenmeye çalışılmıştır. Parametrelerin kaplama üzerindeki etkilerini belirleyebilmek için parametrelerden biri değişken olarak kullanılırken diğer parametreler sabit tutulmalıdır. Aksi takdirde kaplamada meydana gelen değişimlerin hangi parametreden kaynaklandığı anlaşılmaz.

4.1. Nd:YAG Lazeri ve Deneysel Düzenek

Deneysel çalışmalarda GSI Lumonics şirketi tarafından üretilen yüksek demet kalitesine ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmakla birlikte tüm metallerde delme, kesme, kaynak ve kaplama yapabilme yeteneğine sahip atımlı Nd:YAG lazeri kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezinde (LATARUM) var olan ve deneysel çalışmada kullanılan atımlı Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri.

Maksimum ortalama güç	600 W
Maksimum tepe gücü	10 kW
Atım uzunluğu değişim aralığı	0.3ms- 50 ms
Frekans değişim aralığı	5 Hz- 500 Hz
Demet kalitesi (mm.mrad)	28
Dalga boyu	1064 nm

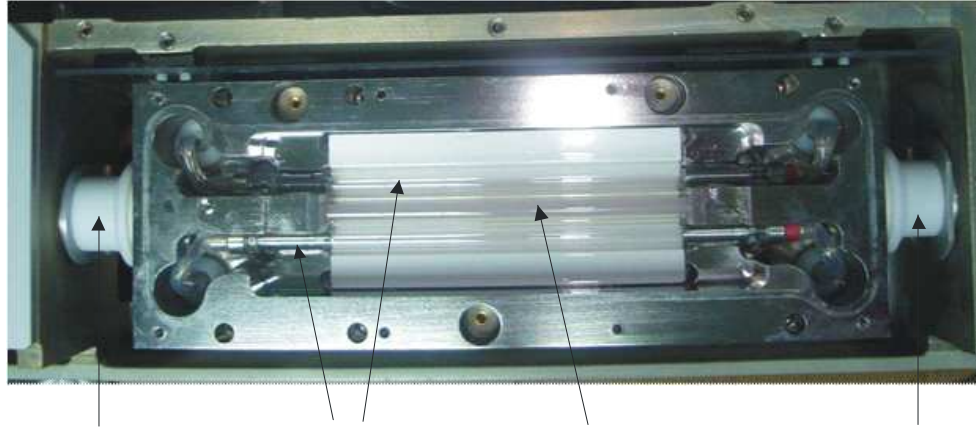
Deneysel çalışmada kullanılan lazer sistemi, güç ünitesi, lazer ışınının oluşturduğu lazer kovuğu ve odaklama ünitesi olmak üzere üç üniteden meydana gelmektedir. Şekil 4.1’de bu üç kısım gösterilmektedir.



Şekil 4.1: Deneysel çalışmalarda kullanılan Nd:YAG lazer sistemi: güç ünitesi, lazer kovuğu ve odaklama ünitesi (LATARUM).

Lazer kavuğunun iç yüzeylerinde birer merkezleri çakışmış vaziyette olan alüminyumdan yapılmış elipslerden oluşmaktadır. Bu elipsler yüksek yansıtıcılığa sahip olmakla birlikte her elipsin merkezlerinin birinde flaş lambaları bulunurken diğer merkezlerinde ise kazanç kristali bulunmaktadır. Lazer kazanç kristali tarafından üretilen elektromanyetik radyasyon, biri % 100 yansıtıcı diğeri % 95 yansıtıcı olan ve birbirine paralel olarak yerleştirilmiş olan iki ayna arasında gidip gelerek güçlenir. % 95 yansıtıcı olan ayna üzerine düşen güçlenmiş lazer ışığının bir kısmı dışarı alınıp, bilgisayar destekli elektro-optik aletlerden geçirilerek 600 μ m

core çapına ve 10 m uzunluğuna sahip fiber optik kablo yardımıyla lazer odaklama ünitesine taşınır. Lazer kovuğu içerisinde bulunan flaş lambalarının soğutulması şehir hattından gelen su ile yapılırken, kristali soğutmak için iyonize su kullanılır. Deneysel çalışmalarda kullanılan Nd:YAG lazerine ait kovuk Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



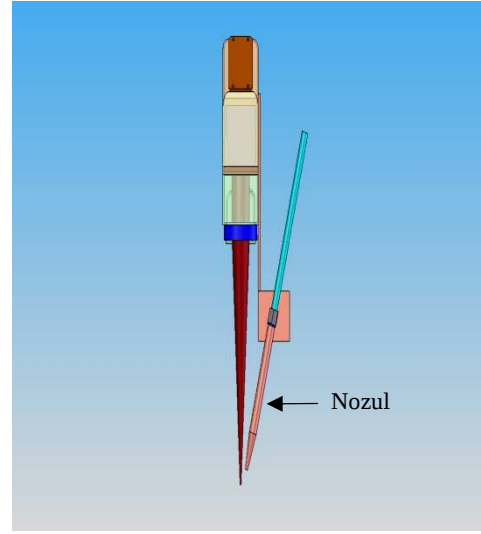
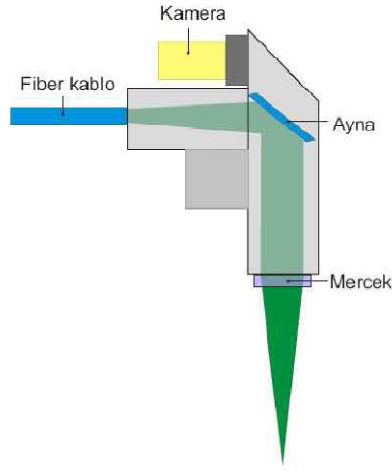
% 95 Yansıtıcı ayna Flaş lambaları Kazanç ortamı % 100 Yansıtıcı ayna

Şekil 4.2: JK760TR Atımlı Nd:YAG lazerinin kovuğu (LATARUM).

Lazer odaklama sisteminde bulunan ve lazer demetini odaklama işlemini gerçekleştiren 160 mm’lik odak uzaklığına sahip olan bir mercek ile kaplama işlemini görüntölemek için lazer kafasında bulunan bir kamera kullanılarak görüntünün en iyi olduğu yer belirlenir ve lazer demetinin malzeme üzerine odaklanması sağlanır.

Odaklama ünitesinin hareketi 3 eksenle hareket edebilen ve bilgisayar tarafından kontrol edilebilen bir CNC sistemi tarafından sağlanmıştır. Kaplama esnasında, erimiş alt tabaka ve kaplama tozlarının çevredeki hava ile reaksiyona girerek oksitlenmesini engellemek ve işlenecek parça üzerine kaplama tozunu taşımak amacıyla taşıyıcı gaz olarak argon kullanılmıştır. Toz çıkışını sağlayan nozulun çapı 1 mm olup lazer demeti ile aynı anda hareket etmesi sağlanmıştır.

Tozun nozula taşınmasını ve kaplama işlemi boyunca homojen bir besleme sağlanması için Sulzer Metco toz besleme ünitesi kullanılmıştır. Toz besleme ünitesi kaplama işlemi boyunca kaplamayı etkileyen parametrelerden biri olan toz kütle akış oranının manuel olarak kolayca ayarlanmasına olanak verir. Ayrıca kaplama tabakasının kalitesini etkileyen bir başka parametre olan ve toz kütle akış oranıyla da bağıntılı olan seyrekliğinde kontrolü sağlanmış olur. Odaklama ünitesi, nozul ve toz besleme ünitesi Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Lazer odaklama, nozul ve toz besleme ünitesi.

4.2. Lazer Demetinin Odağının Belirlenmesi

Lazer demetinin odak noktasının belirlenmesi, ısı yayılımından dolayı numune meydana gelebilecek sorunları minimuma indirmek için ve ayrıca besleme ünitesi tarafından homojen olarak sağlanan kaplama tozunun lazer demetiyle buluşması açısından önemlidir. Lazer demetinin odak noktasının belirlenmesi işleminde hedef olarak paslanmaz çelik kullanılmıştır. Belli bir yükseklikten çelik üzerine vurulan lazer demetinin odak noktası, 1 mm'lik aralıklarla bilgisayar kontrollü CNC sistemi kullanılarak z eksenı boyunca tarama yapılarak bulunmuştur. Lazer demetinin odağı numune üzerine düşürüldükten sonra z ekseninde 6mm yukarı kaydırılmıştır.

4.3. Alt Tabaka ve Kaplama Tozu

Lazer ile yüzey kaplama işlemi, aşınmaya ve paslanmaya karşı daha dayanıklı yeni bir yüzey elde etmek için kimyasal içeri bilinen metal veya metal alaşımının farklı özelliklere sahip başka bir yüzeye uygulanmasıdır [29]. Yüzey kaplama malzemesi olarak birçok metal ve alaşım kullanılır. Bu alaşımlardan süper alaşım olarak bilinen kobalt esaslı olanları Stellite olarak adlandırılırlar [8]. Kobalt manyetik özellikte metalik bir element olup ilk defa 1735 yılında George Brant tarafından elde edildi [51]. Stellite alaşımları yüksek miktarda karbür içerdikleri için yüksek sertliğe sahiptirler. Yüksek tokluğa sahip oldukları için ağır ve mekanik darbeleri ortamlarda kullanımı yaygındır. Yüksek sıcaklığa dayanımları ve aşınma ile paslanmaya karşı daha dayanıklı oldukları için jet motorları, dişçilik, valfler, türbin kanatları, egzoz çıkış boruları, rotor ve cerrahi aletlerin yapımında da kullanılırlar [29,52].

Yüzey kaplama alaşımları genellikle borürler ve karbürler gibi sert çözelti fazı içerdiklerinden dolayı demir, nikel ve kobalt esaslı alaşımlardan oluşan daha yumuşak matrisler içerisinde bulunurlar [29]. Tungsten oranının yüksek olduğu alaşımlarda M_6C karbürüne ek olarak kromca zengin M_7C_3 karbürü de yer alır. Düşük karbonlu alaşımlarda $M_{23}C_6$ karbürü bulunur [8,29,30]. Kobalt esaslı süper alaşımlar, yüksek kesme sıcaklıklarında, yüksek sıcak sertlik eğilimi gösterdikleri için en fazla dikkat çeken türdür. Bu alaşımların içeriklerinde kobalt haricinde anlamlı miktarda nikel, krom, tungsten daha az miktarda ise molibden, niyobyum, tantalyum, titanyum ve duruma göre de demir içerirler. Stellite, Haynes 188, Haynes 25 ve AiResist 13 kobalt esaslı süper alaşımlardır [32]. Deneysel çalışmalarda kullanılan 50-150 μm 'lik Stellite 6 tozunun ve alt tabakanın kimyasal bileşimi Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.2: Stellite 6 tozunun kimyasal bileşimi.

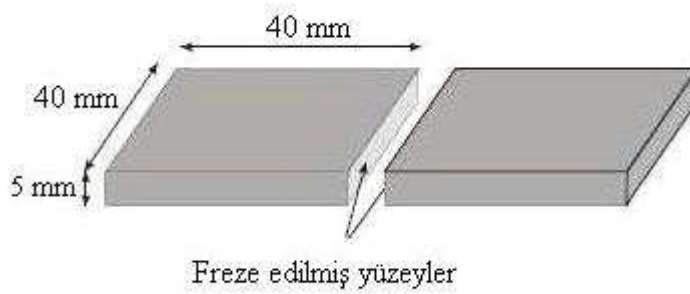
Stellite 6	Ni	Si	Fe	Mn	Co	Cr	C	W
(%)	2.5	1	2.5	1	Bal.	27	1	5

Tablo 4.3: Kullanılan altlık malzemenin kimyasal bileşimi.

6424 ST24 Sıcak Hadde Çeliği (%)							
Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
72.9	0.051	0.435	1.27	0.032	0.020	16.1	0.269
Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
7.89	0.022	0.112	0.602	0.008	0.0057	0.066	0.088

4.4. Paslanmaz Çelik Numunelerinin Kaplama ve Test İşlemlerine Hazırlanması

Kaplama yapılacak numunelerin işleme hazırlanması, üzerlerine yapılacak olan kaplama kalitesi ve daha sonrasında test cihazlarına maruz kalacağı için büyük önem taşımaktadır. Kaplama yapılacak olan numuneler önce 40x40x5mm³ boyutlarında kare prizma şeklinde şerit testere ile kesilmiştir. Kaplama işlemi sonrasında numunelerin bir yüzeyi freze yardımı ile olabildiğince pürüzsüz hale getirilmiştir. Daha sonra optik mikroskop görüntülerinin alınabilmesi için yüzeyin daha düzgün ve pürüzsüz hale gelebilmesi 320, 600 ve en son olarak 1000 no'lu meşlik SiC esaslı zımpara kâğıtlarıyla sağlanmıştır. Numunelerin zımparalama işlemi bittikten sonra nihai parlatma işlemi 3 mikronluk elmas pasta ile yapılmıştır. Kaplama işlemi için hazırlanan numuneler Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Kaplama deneyleri öncesi hazırlanan numuneler.

Kaplama yapılmış numunelerin kaplama yüksekliği, kaplama derinliği ve HAZ bölgelerini optik mikroskopta görebilmek için tüm numunelerde çeşitli dağlayıcılar kullanılmıştır. Daha sonra paslanmaz çeliğin tane sınırlarını ortaya çıkarabilmek için bazı numunelerin yüzeyleri tekrardan parlatılarak farklı bir biçimde dağlanmıştır.

Deney sırasında toz kütle akış miktarı ve hızından dolayı numuneler yerinden oynayabilir. Ayrıca kaplama işlemi boyunca ısınan numunede düşük veya yüksek sıcaklıktan dolayı gerilmenin sebep olacağı çatlaklar meydana gelebilir. Hem numunelerin yerinden oynamaması hem de çatlakların meydana gelmemesi için numuneler bir şasi üzerine menteşeler ile tutturulmuştur.

4.4.1. Numunelere uygulanan dağlama işlemleri

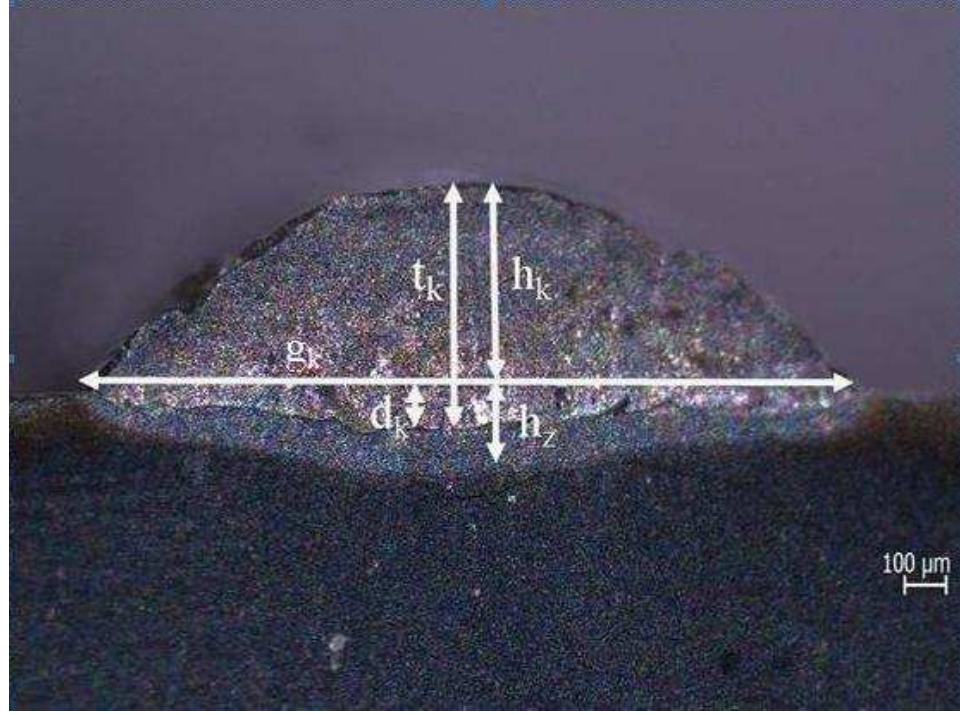
40x40x5mm³ boyutlarında şerit testere ile kesilip zımpara ve parlatma işlemi bittikten sonra kobalt esaslı Stellite 6 tozu ile yapılan kaplama tabakası ve alt tabaka olarak kullanılan paslanmaz çelik birkaç farklı yöntemle dağlama işlemleri gerçekleştirildi.

Öncelikle kesitleri alınmış numunelerin zımpara ve parlatma işlemine tabii tutulmuş yüzleri Marble dağlayıcısı olarak bilinen ve içeriği 4gr CuSO₄ + 20ml HCl + 20ml saf su olan çözeltide 20sn boyunca daldırılarak dağlandı. Daha sonra % 4'lük nital içeren %96 Etil alkol ve % 4 HNO₃ (Nitrik Asit) çözeltisi içerisinde 5 sn boyunca 10 DC gerilimde external olarak dağlandı. Bu iki dağlama ile hem kaplama tabakası hem de paslanmaz çelik alt tabakası dağlanmış oldu. Paslanmaz çeliğin tane sınırlarını ortaya çıkarmak için dağlanmış numunelerden bir kaçının yüzeyleri tekrardan parlatılıp Marble dağlayıcısıyla 2sn boyunca 10 DC gerilimle olarak dağlandı.

BÖLÜM 5. LAZER İLE YÜZEY KAPLAMA İŞLEMİNDE KAPLAMA KALİTESİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

Atımlı Nd:YAG lazeri ve kaplama tozu ile birlikte yapılan lazer kaplama işlemlerinde kaplama tabakasının kalitesini etkileyen birçok parametre mevcuttur. Bu parametreler atım enerjisi, atım frekansı, üst üste binme oranı, seyreklik, toz kütle akış oranı, toz akış hızı, toz besleme açısı, koruyucu gaz ve lazer demetinin veya alt tabakanın hareket hızıdır. İyi bir kaplama tabakası elde etmek tüm bu işlem parametrelerinin iyi bir şekilde kombine edilmesiyle sağlanır. Parametrelerin kaplama tabakası üzerindeki etkilerini belirlemek için parametrelerin birçoğu sabit tutularak yapılan deneylerle belirlenebilir. Aksi takdirde hangi parametrenin kaplamayı ne ölçüde etkilediğini bulmak zorlaşır ve iyi bir kaplama tabakası elde etmek daha karmaşık bir hale gelir. Deneysel çalışmaların yapıldığı bu bölümde en iyi kaplama parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Parametrelerin kaplama işlemi üzerindeki etkileri yapılan testlerle elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen veriler, görüntüler ve grafikler ayrıntılı bir şekilde verilecek ve değerlendirmeleri yapılacaktır.

Deneysel numunelerin sertlik ölçümleri Fisherscope H100 marka Vickers mikro sertlik ölçme cihazı ile yapılmıştır. Deney numunelerinin sertlikleri ölçüldükten sonra tüm numunelerin görüntüleri Zeiss AxioTech marka refleksiyon tipi ışık mikroskobu ile alınmıştır. Daha sonra bazı numunelerin SEM görüntüleri Jeol JSM 6060 marka tarama elektron mikroskobu ile alınmıştır. Numunelerin tümünün hazırlanma, görüntülerinin alınması ve sertlik testleri Kocaeli Üniversitesi Malzeme ve Metalurji Mühendislik Fakültesi Mekanik Özellikler Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında kaplama bölgeleri ve ısıdan etkilenen bölgeler Şekil 5.1’de gösterildiği gibi simgelenmiştir. Kaplama genişliği g_k , kaplama derinliği d_k , kaplama yüksekliği h_k , toplam kaplama yüksekliği t_k ve HAZ bölgesinin derinliği h_z ile simgelenmektedir.



Şekil 5.1: Testler sırasında kullanılan uzaklık simgeleri.

5.1. Atım Enerjisinin Kaplama Yüksekliği Üzerine Etkisi

Lazer ile yüzey kaplama işleminde atım enerjisinin kaplama yüksekliği ve seyrekliği üzerine etkilerini daha iyi görmek için gerçekleştirilen deneylerde, atım enerjisinde 12 J, 14 J, 16 J ve 18 J olmak üzere 2 J'lük artış yapılarak diğer parametreler sabit tutulmuştur. Deney sırasında kullanılan parametreler Tablo 5.1'de verilmektedir.

Tablo 5.1: Atım enerjisinin etkisinin belirlenmesinde kullanılan parametreler.

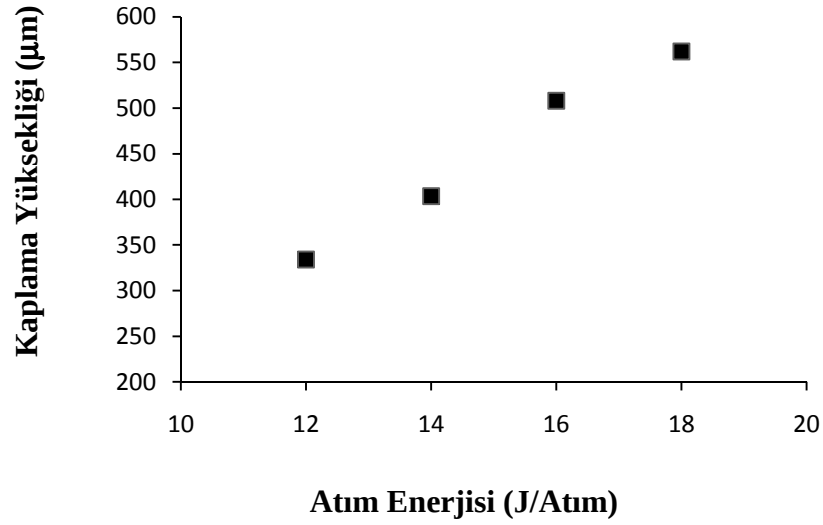
Deney No	Atım Enerjisi (J)	Atım Frekansı (Hz)	Üst Üste Binme Oranı (%)	Kaplama Hızı (mm/s)	Atım Uzunluğu (ms)	Toz Kütle Akış Oranı (gr/dak.)
1A	12	20	85	3	5	18.63
1B	14	20	85	3	5	18.63
1C	16	20	85	3	5	18.63
1D	18	20	85	3	5	18.63

Atım enerjisinin artışıyla birlikte kaplama yüksekliğinde bir artış meydana gelmiştir. Diğer parametrelerin sabit olmasından dolayı kaplama yüksekliği, içine işleme derinliği ve HAZ bölgesi derinliği değişim sadece atım enerjisiyle değişmektedir. Değişken parametre olarak sadece atım enerjisinin değiştirilmesi ile elde edilen deneysel veriler Tablo 5.2’de gösterilmektedir.

Tablo 5.2: Atım enerjisinin kaplama yüksekliği üzerindeki etkisinin belirlenmesinde kullanılan parametreler ve elde edilen sonuçlar.

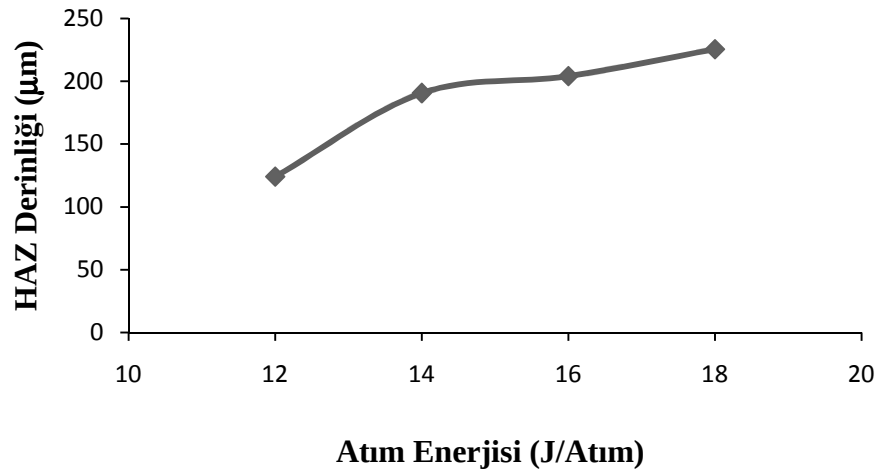
Atım Frekansı (Hz)	Üst Üste Binme Oranı (%)	Atım Enerjisi (J/atım)	Kaplama Genişliği (mm)	Kaplama Yüksekliği (μm)	İçine İşleme Derinliği (μm)	Seyreklik (%)
20	85	18	2.04	562.2	104.9	15.7
20	85	16	2.03	508.2	98.5	16.2
20	85	14	2.00	409.8	89.0	17.8
20	85	12	1.94	334.0	77.9	18.9

Sabit toz kütle akış oranında, artan atım enerjisi değerinden dolayı toz üzerine daha çok enerji geleceğinden daha fazla tozun eriyerek alt tabakaya yapıştığı ve bu sayede kaplama yüksekliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Tablo 5.2’de görüldüğü gibi atım enerjisinin artışı kaplama yüksekliğinde belirgin bir artışa sebep olmuştur. Atım enerjisi 12 J’de gerçekleştirilen deneyde elde edilen kaplama tabakasının yüksekliği 334.0 mikron iken 18 J’de elde edilen kaplama yüksekliği 562.2 mikron olmuştur. Kaplama yüksekliğinin atım enerjisine göre değişim grafiği Şekil 5.2’de verilmektedir.



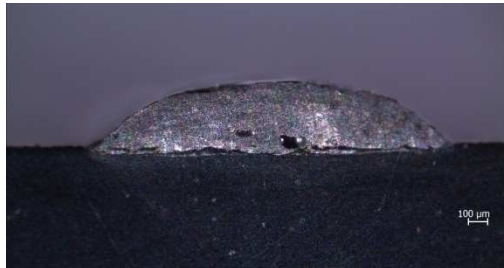
Şekil 5.2: Kaplama yüksekliğinin atım enerjisine göre değişimi.

Ayrıca atım enerjisinin artması kaplama yüksekliğiyle birlikte kaplama genişliğini, içine işleme derinliğini ve seyrekliği de etkilemiştir. Artan atım enerjisinden dolayı alt tabakaya giren enerji miktarı artmış ve dolayısıyla daha fazla toz eriyip alt tabakaya karışmıştır. Bu sebepten dolayı içine işleme derinliği de atım enerjisiyle bağlantılı olarak artmıştır. Spot çapı (2.5 mm) sabit tutulmasına rağmen artan atım enerjisinden dolayı kaplama genişliğinde spot çapına doğru bir artış olmuştur. Alt tabakaya giren ısı miktarının artışı nedeniyle HAZ bölgesinde de artış meydana gelmiştir. Yapılan 1 A, 1 B, 1 C ve 1 D deneylerinde elde edilen HAZ derinliği değerleri sırasıyla 124.0 mikron, 190.5 mikron, 204.1 mikron ve 225.5 mikrondur. Atım enerjisinin artışıyla HAZ bölgesinde meydana gelen değişim Şekil 5.3’de gösterilmektedir.

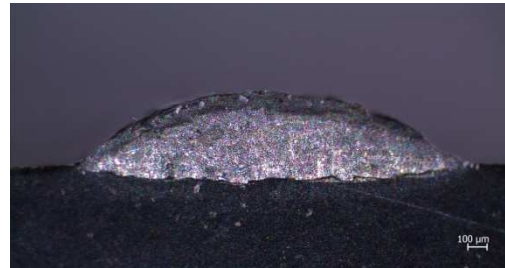


Şekil 5.3: HAZ bölgesinin atum enerjisine göre değişimi.

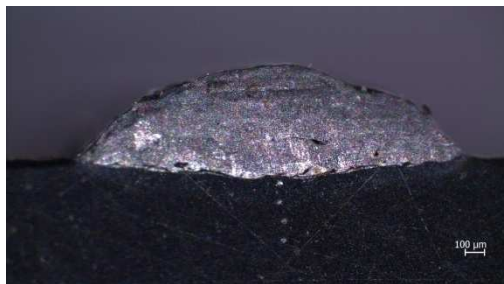
Tablo 5.2'ye bakıldığında atum enerjisinin artması her ne kadar kaplama yüksekliğiyle birlikte içine işleme derinliğini de arttırmış olsa geometrik seyreklik düşmüştür. Çünkü içine işleme derinliğinde meydana gelen artış kaplama yüksekliğinde meydana gelen artışa göre daha azdır. Kaplama işlemlerinden sonra numunelerin optik mikroskoptan alınan görüntüleri Şekil 5.4'te ki gibidir.



1 A
Atum enerjisi: 12 J



1 B
Atum enerjisi: 14 J



1 C
Atum enerjisi: 16 J



1 D
Atum enerjisi: 18 J

Şekil 5.4: Artan atum enerjisi ile elde edilen kaplamaların optik mikroskop görüntüleri.

5.2. Atım Frekansı Kaplama Yüksekliği Üzerine Etkisi

Sabit 12 J'lük atım enerjisinde frekans değerlerindeki artış, atım başına enerji miktarının artışına sebep olmuştur. Böylece lazer demetinin, kaplama tozu ve alt tabaka üzerindeki etki süresi artmıştır. Frekansın artışından kaynaklanan etkileşim süresinin artması ısı girişinin artmasına neden olmuştur. Bunun sonucunda içine işleme miktarında ve kaplama yüksekliğinde frekansın enerjiye bağlı olmasından dolayı artış meydana gelmiştir. Frekans artışının etkisini görmek için kullanılan deneysel parametreler Tablo 5.3'te verilmektedir.

Tablo 5.3: Sadece frekansın değişken alındığı deneysel veriler.

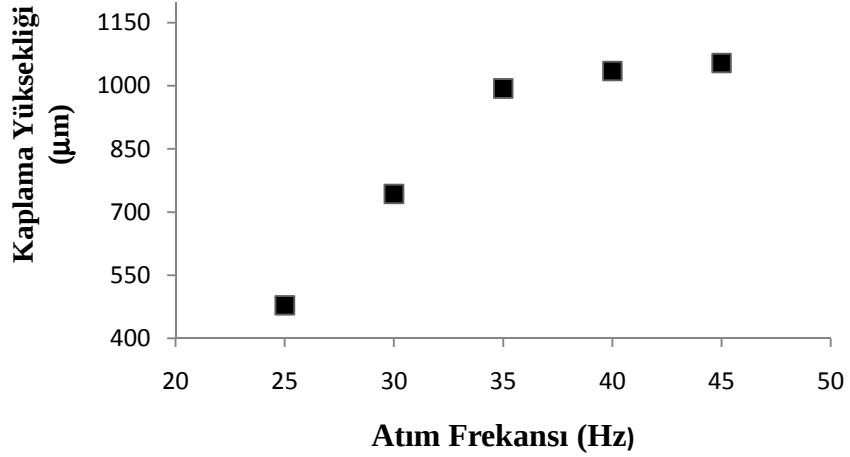
Deney No	Atım Enerjisi (J)	Atım Frekansı (Hz)	Üst Üste Binme Oranı (%)	Atım Uzunluğu (ms)	Kaplama Hızı (mm/s)	Toz Kütle Akış Oranı (gr/dak.)
2A	12	25	80	5	3	18.63
2B	12	30	80	5	3	18.63
2C	12	35	80	5	3	18.63
2D	12	40	80	5	3	18.63
2E	12	45	80	5	3	18.63

Tablo 5.3'teki deneysel parametreler ile gerçekleştirilen deneyler sonrası elde edilen kaplama genişliği, kaplama yüksekliği, içine işleme ve HAZ derinlik verileri Tablo 5.4'te gösterilmektedir.

Tablo 5.4: Frekans artışı ile değişen kaplama yüksekliklerinin ve içine işleme derinliklerinin verileri.

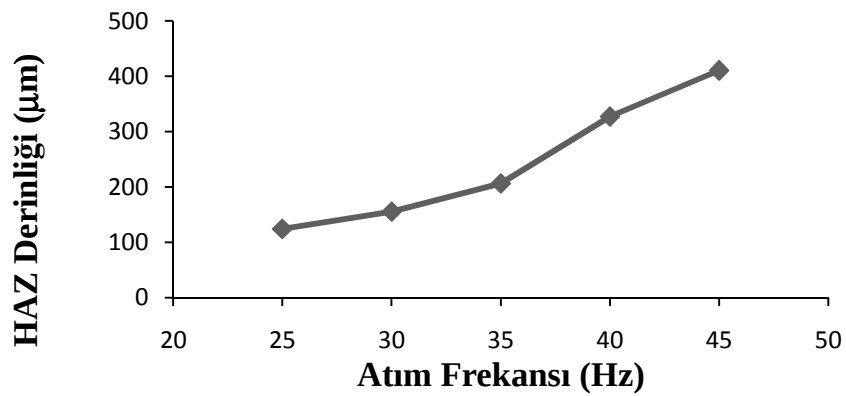
Atım Frekansı (Hz)	Üst Üste Binme Oranı (%)	Atım Enerjisi (J/atım)	Kaplama Genişliği (mm)	Kaplama Yüksekliği (µm)	İçine İşleme Derinliği (µm)	HAZ (µm)	Seyreklik (%)
25	80	12	1,87	478.6	47.7	124.0	9.1
30	80	12	1,94	743.2	76.2	155.4	9.3
35	80	12	1,96	994.1	104.7	206.4	9.5
40	80	12	2,02	1035.4	203.3	327.1	16.4
45	80	12	2,04	1054.5	339.8	410.0	24.4

Atım frekansının kaplama yüksekliğine olan etkisinde ki değişim şekil 5.4'te gösterilmektedir.



Şekil 5.5: Kaplama yüksekliğinin atım frekansına göre değişimi.

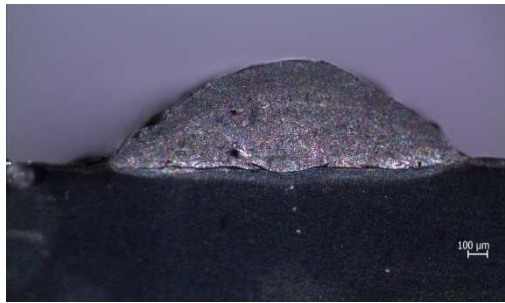
Artan frekansta tozun daha çok erimesiyle meydana gelen içine işleme ve kaplama yüksekliği haricinde alt tabakaya giren ısı miktarındaki artış nedeniyle alt tabakanın ısıdan etkilenen bölgesi yani HAZ bölgesinde de artış meydana gelmektedir. HAZ bölgesinin atım frekansına göre değişimi Şekil 5.6'te verilmiştir.



Şekil 5.6: HAZ bölgesinin atım frekansına göre değişimi.

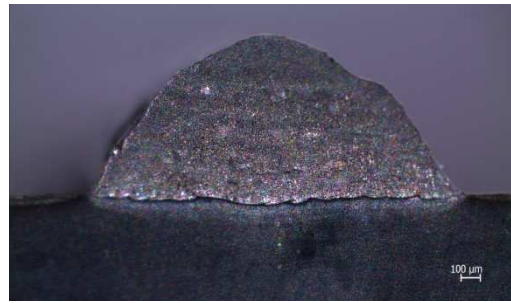
Atım frekansının artması ile kaplama tabakasının yüksekliği ve içine işleme derinliği artmıştır. Literatür taramasından elde edilen bilgilere göre frekans artışının kaplama

yüksekliğini arttırırken içine işleme derinliğini de arttırdığı görülmüştür. Frekans artışı kaplama tabakasının geometrik seyrekliğini azaltması gerekirken burada frekans artışı ile geometrik seyreklik artmıştır. Seyreklikteki bu artışın sebebi olarak atım frekansının artışına bağlı olarak atım enerjisinin artması ve dolayısıyla toz ve alt tabakanın lazer demeti ile etkileşim süresinin artmasından kaynaklanan ısısal çarpıklık gösterilebilir. Her ne kadar dakikada 18.63 gr'lık toz kütle akış oranı ile beslenen toz, gelen atım enerjisini daha çok absorbe edip altlık malzemeye yapışarak kaplama yüksekliğini arttırsa da yetersiz kaldığı için alt tabakaya daha çok ısı girmesine neden olmuştur. Dolayısıyla seyreklik artmıştır. Ancak bu parametrelerde elde edilen ölçümler ile yapılan diğer tüm deneysel numunelerden alınan ölçümler karşılaştırıldığında % 9.1 'lik en düşük seyreklik değerine ulaşılmıştır. Ayrıca 492 HV (Hardness of Vickers)'lik en yüksek sertlik değeri elde edilmiş olup seyreklik değerindeki azalmanın kaplama tabakasının sertliğini arttırdığı gözlemlenmiştir. Kaplama sonrası optik mikroskopuyla alınan görüntülerde kaplama yüksekliği ve içine işleme derinliğindeki değişim açıkça gözükmemektedir. Şekil 5.7'de optik mikroskopuyla alınan görüntüler verilmektedir.



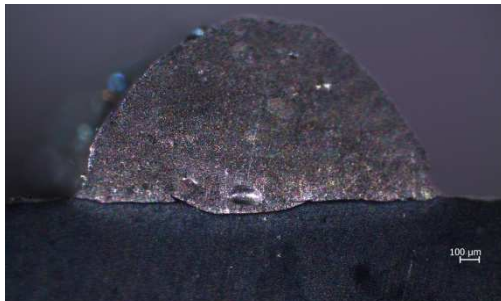
2 A

Atım frekansı: 25 Hz



2 B

Atım frekansı: 30 Hz



2 C

Atım frekansı: 35 Hz



2 E

Atım frekansı: 45 Hz

Şekil 5.7: Artan frekans ile elde edilen kaplamaların optik mikroskop görüntüleri.

5.3. Toz Kütle Akış Oranının Kaplama  zerindeki Etkisi

Lazer ile yüzey kaplama yönteminde dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden biri toz kütle akış oranıdır. Bu parametre kaplama tabakasının yüksekliğini, içine işleme derinliğini doğrudan etkiler. Toz kütle akış oranının artmasıyla kaplama yüksekliği artarken içine işleme derinliği azalır dolayısıyla seyreklik azalır. Fakat burada dikkat edilmesi gereken olay toz kütle akış oranının gereğinden az veya fazla olmamasıdır. Kaplanacak numunenin yüzeyine beslenen toz miktarı az olursa lazer enerjisi alt tabakaya daha çok nüfus eder ve dolayısıyla içine işleme artar. Buda seyrekliğin artmasına ve kaplama kalitesinin düşmesine sebep olur. Eğer sabit bir atım enerjisinde gereğinden fazla toz gönderilirse o zaman da lazer enerjisi gelen tozu eritmekte ve alt tabakaya yapıştırmakta yetersiz kalır. Bu olay kaplamanın kalitesini düşür. Bütün parametreler sabit tutularak 5 farklı toz kütle akış oranında deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde kullanılan deneysel parametreler Tablo 5.5'te verilmektedir.

Tablo 5.5: Toz kütle akış oranının deneysel parametreleri.

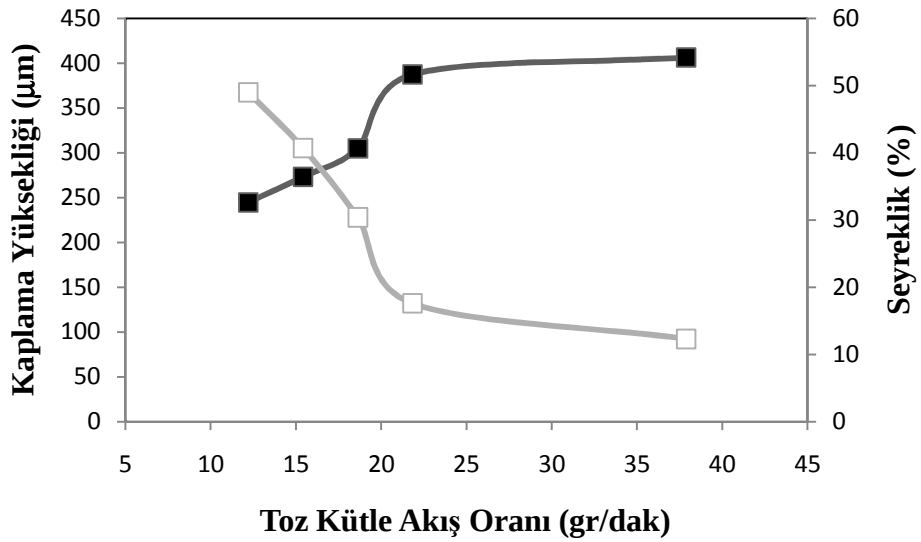
Deney No	Atım Enerjisi (J)	Atım Frekansı (Hz)	�st üste Binme Oranı (%)	Kaplama Hızı (mm/s)	Atım Uzunluğu (ms)	Toz Kütle Akış Oranı (gr/dak)
3A	12	30	80	6	5	12.20
3B	12	30	80	6	5	15.41
3C	12	30	80	6	5	18.63
3D	12	30	80	6	5	21.83
3E	12	30	80	6	5	37.88

Gerçekleştirilen deneylerde toz kütle akış oranının artışı, kaplama yüksekliğini ve içine işleme derinliğini arttırmış ama seyrekliği d ş m ştir. Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler Tablo 5.6'da verilmektedir.

Tablo 5.6: Toz kütle akış oranının değiştirilmesiyle elde edilen deneysel veriler.

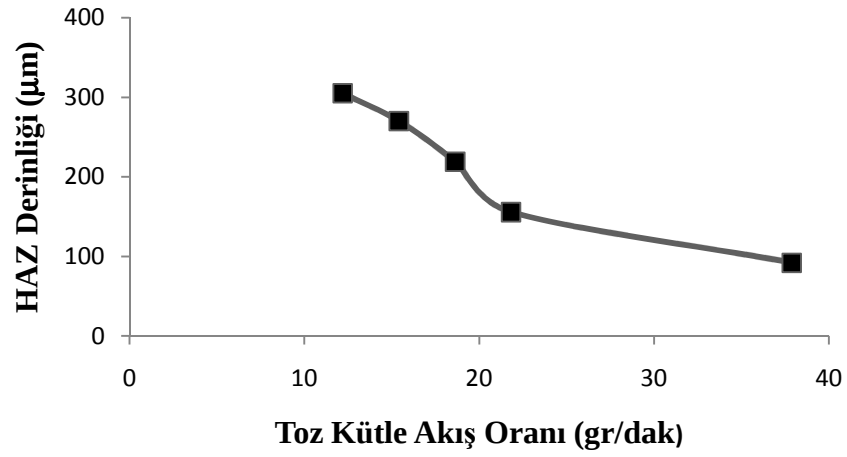
Atım Frekansı (Hz)	�st üste Binme Oranı (%)	Atım Enerjisi (J/atım)	Kaplama Genişliği (mm)	Kaplama Yüksekliği (�m)	İçine İşleme Derinliği (�m)	Seyreklik (%)	HAZ (�m)
30	80	12	1.93	244.6	235.0	49.0	304.9
30	80	12	2.01	273.1	187.4	40.7	270.0
30	80	12	1.96	304.9	133.4	30.4	219.1
30	80	12	1.89	387.5	82.6	17.6	155.7
30	80	12	1.87	406.4	57.2	12.3	92.1

Kaplama yüksekliği ve seyrekliğin toz kütle akış oranına göre değişimi şekil 5.8’de gösterilmektedir.



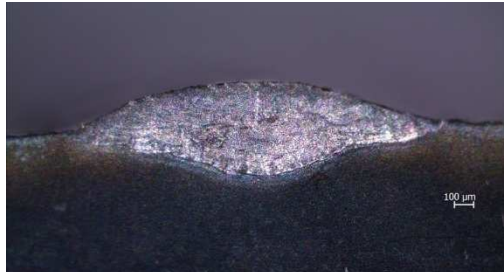
şekil 5.8: Toz kütle akış oranının kaplama yüksekliği ve seyreklik üzerindeki etkisi.

Toz kütle akışının artmasıyla tozun soğurduğu enerji alt tabakaya göre daha fazla olmuştur. Buda alt tabakaya giren ısı miktarının düşmesine neden olacağı için ısının alt tabakayı etkileme derinliği olan HAZ bölgesinde de bir düşüş meydana gelmesine neden olmuştur. şekil 5.9 toz kütle akış oranının artışıyla HAZ bölgesinde meydana gelen değişimi göstermektedir.



Şekil 5.9: Toz kütle akış oranına göre HAZ derinliğinin değişimi.

Kaplama deneylerinden sonra çekilen optik mikroskop resimleri Şekil 5.10'da gösterilmektedir.



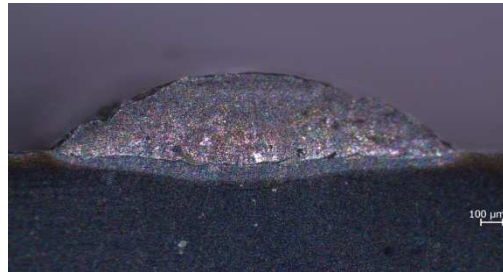
3 A

Atım enerjisi: 12 J
Toz kütle akış oranı: 12.2 gr / dak.



3 B

Atım enerjisi: 12 J
Toz kütle akış oranı: 15.41gr / dak.



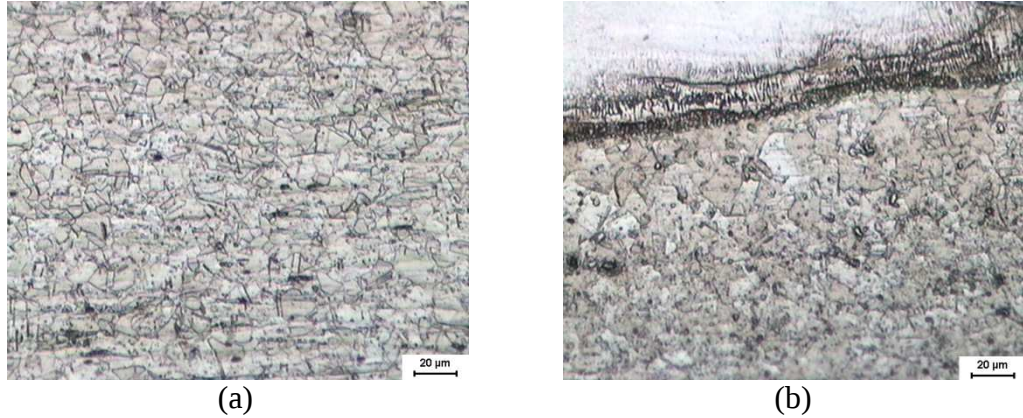
3 D

Atım enerjisi: 12 J
Toz kütle akış oranı: 21.83 gr / dak.

Şekil 5.10: Değişen toz kütle akış oranı ile elde edilen kaplama görüntüleri.

5.4. Mikroyapısal Karakterizasyon

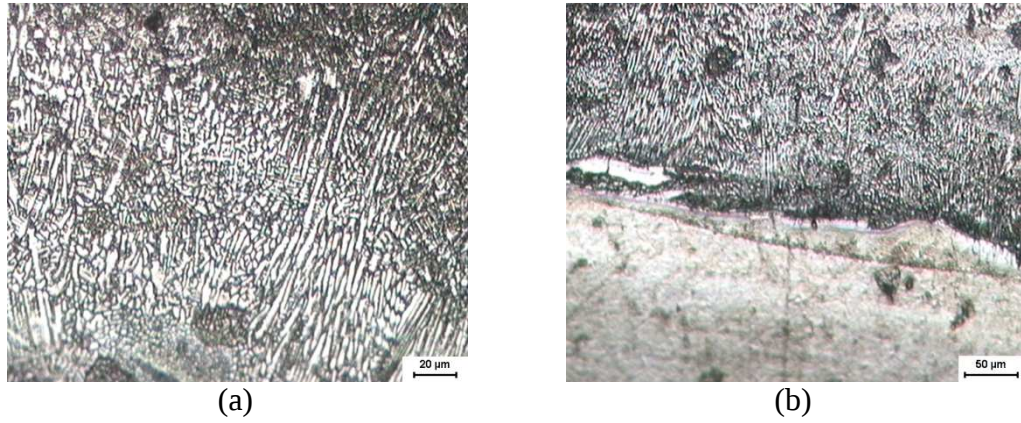
Deneysel çalışma kapsamında metalografik hazırlık sonrası numuneler dağlanmış konumda ışık ve tarama elektron mikroskopları ile incelenmiştir. Şekil 5.11a’da altlık malzemeye ait bir mikroyapı örneği verilmiştir. Altlık malzeme tipik östenitik paslanmaz çelik olup mikroyapıdan da görüleceği üzere yoğun ikiz içerikli bir östenitik matriksten ibarettir. Şekil 5.11b ise kaplama ile birlikte altlık malzemeye olan ısı girdisinin bir sonucu olarak arayüzey boyunca meydana gelen tane kabalaşmalarını göstermektedir. Altlık malzemeye olan ısı girdisi yöresel olarak difüzyonu teşviklendirerek orijinal tane boyutunun artmasına neden olmaktadır. Çoğunlukla bu tür kaba oluşumlar malzeme içerisinde daha düşük sertlik ve mukavemet değerleri sunacağından istenmeyen oluşumlar olarak değerlendirilir.



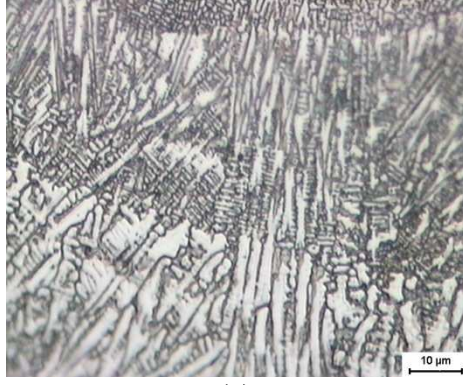
Şekil 5.11: (a) Altlık malzemeye ait yoğun ikizlenmiş tane yapısını gösteren orijinal mikroyapı ve (b) kaplama arayüzeyine yakın konumda kaba östenitik tane yapısı.

Şekil 5.12-5.16’da çeşitli deneysel kaplama işlemleri sonrasında gerek kaplama gerekse de kaplama-altlık malzeme arayüzeyini gösteren mikroyapı örnekleri verilmiştir. Ergimiş tozların altlık malzeme üzerine düşmesi sonrasında ergiyik malzemenin ıslatma kabiliyetine de bağlı olarak belirli bir genişlik ve yükseklikte bir ergiyik havuzu oluşturabilir. Soğuma altında bu ergiyik haldeki metalin tipik dendritik katılaşma göstermesi kaçınılmazdır. Soğuma koşulları ve ergiyik içerisindeki empürite miktarı dendritlerin ince veya kaba bir morfolojide oluşumunu

doğrudan etkileyecektir. Hızlı soğumalar ile birlikte daha ince bir dendritik katılaşma morfolojisi elde edilecektir. Diğer taraftan yüksek miktardaki empüritelere katılaşma cephesinde önemli bir bariyer oluşturarak dendritin büyümesine engel olabilecektir. Empüriteler çoğunlukla katılaşma mekanizmasında bir taraftan çekirdeklenme görevi üstlenirken diğer taraftan da özellikle interdendritik uzaylarda çökelti veya herhangi bir ikincil fazın oluşumuna olanak verecektir. Mikroyapı örneklerinden de görüleceği üzere nihai katılaşma yöresi olan saf kaplama yörelerinde ince/kaba morfolojiye sahip dendritler mevcuttur. Çoğunlukla orijinal dendrite göre daha koyu kontrastlı gözlenen yöreler ise kaplama malzemesinin de alaşım kimyasına bağlı olarak varolabilecek intermetalikleri (örneğin; Co_3W) işaret etmektedir. Çeşitli parametreler kullanılarak kaplanmış altlık malzemelerde özellikle kaplama-altlık malzeme arayüzeylerinde iyi bir bağlantının olduğu gözlenmiştir. Bu tür kaplama proseslerinde arayüzeyde varolabilecek boşluklar tipik çatlak çekirdeklenme yöresi gibi davranıp kaplama-altlık malzemesi ayrışmalarına kaynak teşkil etmektedir.



Şekil 5.12: 1A numunesinde (a) kaplama ve (b) kaplama altlık malzeme geçiş bölgesine ait mikroyapı örnekleri.



(a)



(b)

Şekil 5.13: 1C numunesinde (a) kaplama ve (b) kaplama altlık malzeme geçiş bölgesine ait mikroyapı örnekleri.

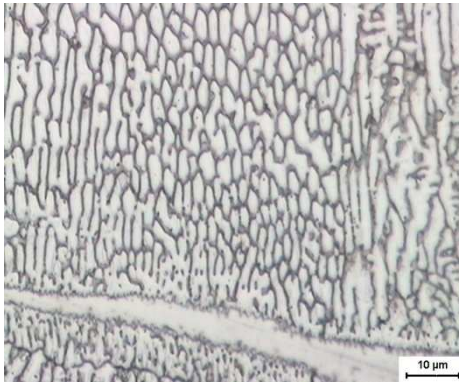


(a)

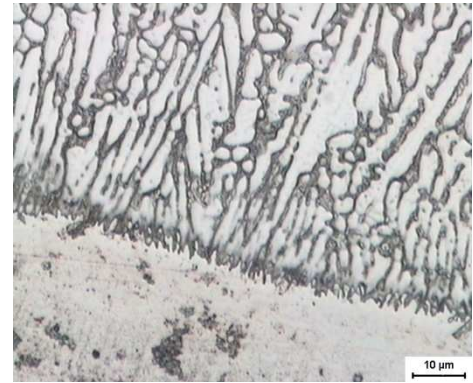


(b)

Şekil 5.14: 1D numunesinde (a) kaplama ve (b) kaplama altlık malzeme geçiş bölgesine ait mikroyapı örnekleri.



(a)

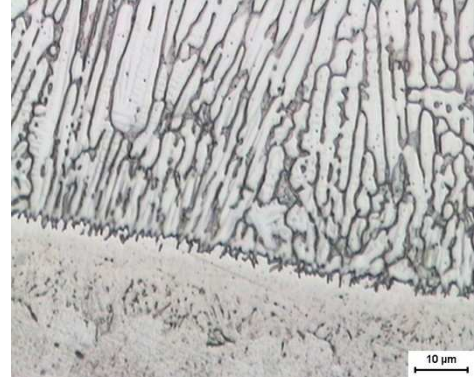


(b)

Şekil 5.15: 2B numunesinde (a) kaplama ve (b) kaplama alt malzeme geçiş bölgesine ait mikroyapı örnekleri.



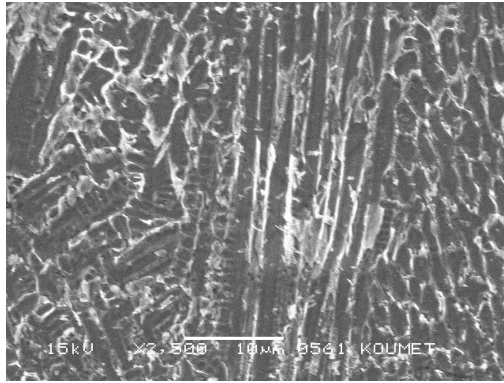
(a)



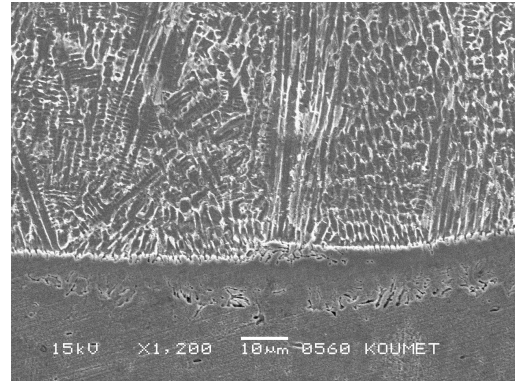
(b)

Şekil 5.16: 2D numunesinde (a) kaplama ve (b) kaplama alt malzeme geçiş bölgesine ait mikroyapı örnekleri.

Şekil 5.17 ve 5.18’de ise kaplanmış numuneler üzerinde yapılan elektronmetalografik incelemelerden örnekler verilmiştir. Homojen bir ara yüzeye ek olarak özellikle katılaşma yörelerinde farklı yönlenmelerde dendritik alanlar mevcuttur. İnterdendritik uzaylarda var olabilen ince çökelti mekanik özellikleri doğrudan geliştirerek yumuşak bir karakteristik sergileyebilen dendritik matriksi oldukça güçlü bir matriks gibi davranmasına katkı sağlayacaktır.

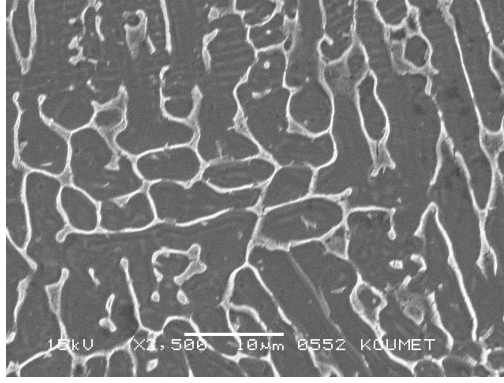


(a)

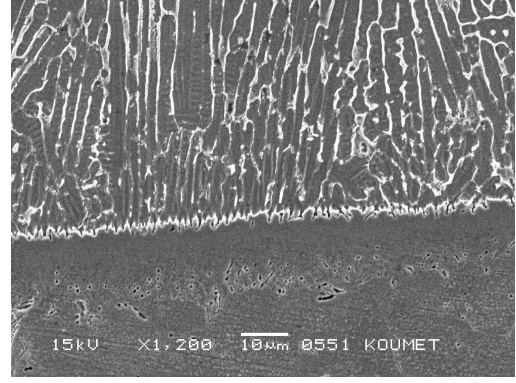


(b)

5.17: 2 A numunesinde (a) kaplama ve (b) kaplama alt malzeme geçiş bölgesine ait mikroyapı örnekleri.



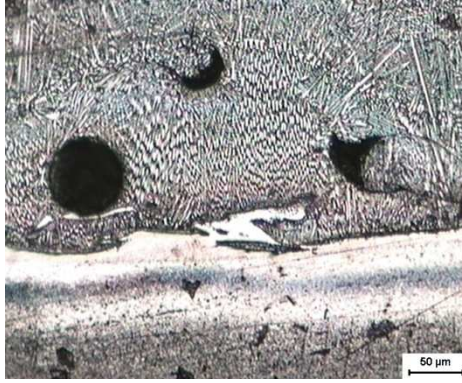
(a)



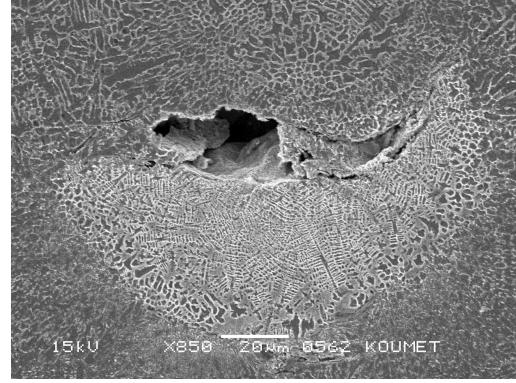
(b)

Şekil 5.18: 2E numunesinde (a) kaplama ve (b) kaplama alt malzeme geçiş bölgesine ait mikroyapı örnekleri.

Kaplama işlemlerinde çoğunlukla karşılaşılan hata ise ortamda koruyucu atmosfer oluşturan ve ısı etkisiyle iyi akış gösterebilen argon gazının ergiyik havuzu terk etmesi ile birlikte geride bıraktığı gaz boşluklarıdır. Şekil 5.19’da tipik gaz boşlukları ışık ve tarama elektron mikroskop görüntüleri ile örneklenmiştir. Bu oluşumlar malzeme içerisinde çoğu mekanik özelliklerin gerilemesine neden olabilecektir.



(a)



(b)

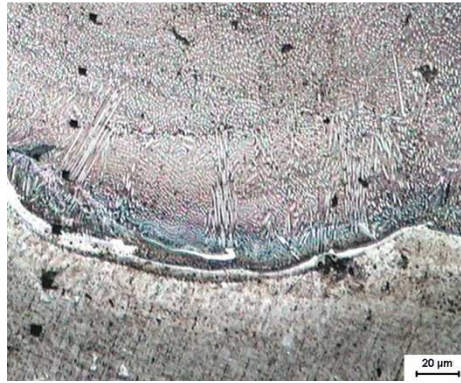
Şekil 5.19: Kaplama hatalarını örnekleyen mikroyapılar, (a) ışık mikroskop ve (b) tarama elektron mikroskop görüntüsü.

5.5. Mikrosertlik Değişimi

Bir materyalin sertliği, statik veya dinamik yükleme koşulları altında sürtünmeye, çizilmeye, kesilmeye veya plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Vickers sertliğinin avantajı, oldukça doğru okumalar yapması ile tüm metal ve işlem görmüş yüzeyler için sadece tek çeşit batıcı ucun kullanılmasıdır. Böylelikle malzeme ölçüm sırasında fazla hasar görmemiş olur ve aynı numune üzerinde başka ölçümlerde yapılabilir. Bu yöntemle en yumuşak malzemeden en sert malzemeye kadar geniş bir aralıkta sertlik ölçümü yapılabilir.

Vickers sertlik deneyi, üzerine yük eklenmiş ve tepe açısı 136° olan bir kare piramidin sertliği ölçülecek olan malzemenin yüzeyine batırılması ile gerçekleşir. Piramit uç malzemeye battığında bir iz bırakır. İzin ölçülmesi için cihaza eklenmiş metalürji mikroskopuyla görüntü ölçme ekranına aktarılır. Ölçme ekranında bulunan hareketli iki cetvel yardımıyla oluşan izin köşegen uzunluğu hassas bir şekilde ölçülür ve elde edilen veriler ile malzemenin sertliği hesaplanır.

Yapılan sertlik ölçümlerinde test cihazında baskı yükü olarak 100 gr ve yükleme süresi 20 saniye olarak seçilmiştir. Kaplama ve alt tabaka ara yüzünden başlayarak ölçüm yapılmaya başlanmıştır. Ölçümler 100 μm aralıklarla hem alt yüzeye hem de kaplama tabakasına doğru yapılmıştır. Sertlik testi yapılan numune görüntüsü Şekil 5.20’da gösterilmektedir.



Şekil 5.20: Kaplama ile alt tabaka ara yüzeyinden başlanarak 100 mikron aralıklarla yapılan Vickers sertlik ölçümü.

Toz kütle akış oranı değiştirilerek yapılan deneylerde elde edilen kaplama numunelerinin sertlikleri ölçülmüştür. Sertlikleri  l  len numunelerin deneysel parametreleri Tablo 5.7’de gösterilmiştir.

Tablo 5.7: Toz Kütle Akış Oranı değiştirilerek yapılan deneylerin parametreleri.

Deney No	Atım Enerjisi (J)	Atım Frekansı (Hz)	�st üste Binme Oranı (%)	Kaplama Hızı (mm/s)	Atım Uzunluğu (ms)	Toz Kütle Akış Oranı (gr/dak.)
4A	14	30	80	6	5	12.20
4B	14	30	80	6	5	15.41
4C	14	30	80	6	5	18.63
4D	14	30	80	6	5	21.83
4E	14	30	80	6	5	25.04
4F	14	30	80	6	5	31.46

100 mikronluk aralıklarla gerçekleştirilen sertlik ölçümlerinin yapıldığı numunelerde, toz kütle akış oranının da ki değişim miktarının seyrekliği doğrudan etkilemesi ve ayrıca bu etki sonucunda seyrekliğin değişmesinden dolayı kaplamaların mikro sertlik değerlerinde meydana gelen değişimin incelenebilmesi için değişken parametre olarak toz kütle akış oranı seçilmiştir. Ölçümlerden elde edilen sertlik değerleri tablo 5.8’de verilmektedir.

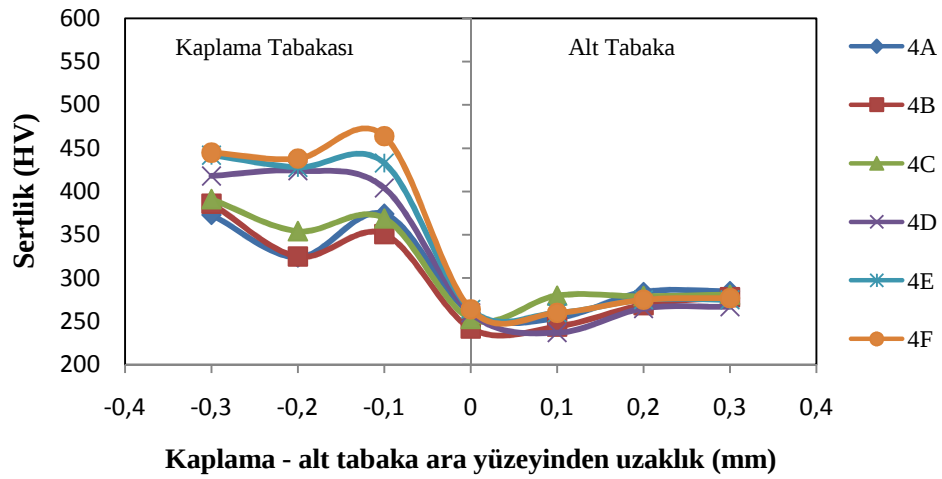
Tablo 5.8: Vickers sertlik testi sonucu elde edilen sertlik değerleri.

Deney No Uzaklık	4 A	4 B	4 C	4 D	4 E	4 F
300 �m	373 HV	386 HV	391 HV	418 HV	442 HV	445 HV
200 �m	324 HV	325 HV	354 HV	424 HV	428 HV	438 HV
100 �m	374 HV	351 HV	369 HV	404 HV	433 HV	464 HV
0	260 HV	242 HV	253 HV	260 HV	264 HV	264 HV

Tablo 5.8: (Devam) Vickers sertlik testi sonucu elde edilen sertlik değerleri.

-100 μm	254 HV	244 HV	280 HV	237 HV	260 HV	260 HV
-200 μm	284 HV	269 HV	279 HV	265 HV	275 HV	275 HV
-300 μm	285 HV	278 HV	281 HV	267 HV	275 HV	277 HV
Seyreklik (%)	56.2	52.9	43.8	28.1	27.4	27.1

Yapılan ölçümlerde altlık malzeme olarak kullanılan haddelenmiş paslanmaz çeliğin sertlik değerinin 242 HV ile 285 HV arasında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Stellite 6 tozu kullanılarak yapılan kaplamalar sonrasında kaplama tabakasının sertlik değerinin 324 HV ile 464 HV arasında değişim göstermiştir. Ara yüzey ve ara yüzeyden 100 mikron aralıklar ile ölçülen alt tabakanın ve kaplama tabakasının sertlik değişimleri Şekil 5.21’de gösterilmektedir.

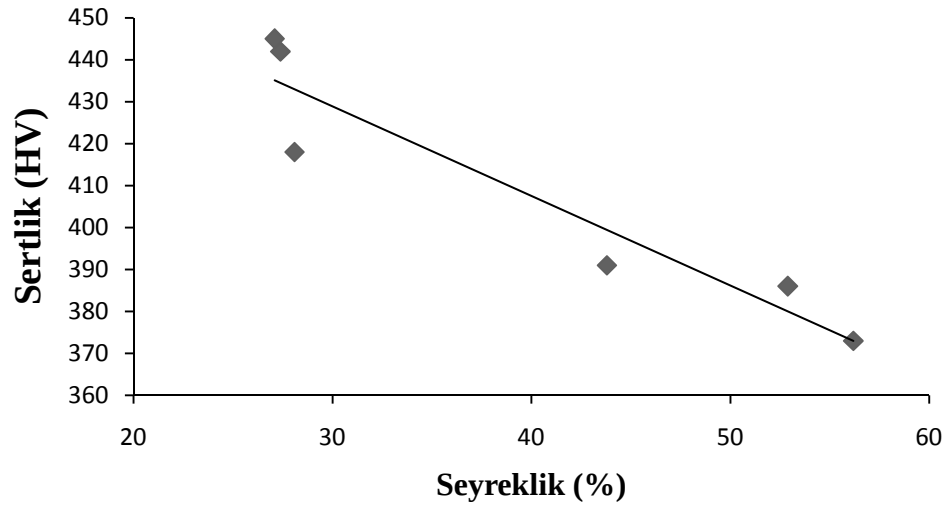


Şekil 5.21: Ara yüzeyden 100 mikronluk uzaklıklarla alınan sertlik ölçümleri.

Belirli bir zaman aralığında sürekli sıvı ile beslenen ergiyik havuzunda bir taraftan hızlı soğumalar nedenli olarak iğnesel şekilli ince denritik katılaşmanın gerçekleşmesi diğer taraftan da interdendritik uzaylarda sert intermetalik çökeltilerin oluşumu bu sertlik artışına önemli bir katkı sağlayacaktır. Sertliğin ara yüzeyde

önemli ölçüde azalması ikiz tane yapısı sergileyen östenitik matrikste meydana gelen kaba tane oluşumu nedenlidir. Altlık malzemenin oldukça düşük karbon içermesi ısı girdisi sonrası katı-katı dönüşümlerinin hakim olduğu konumda krom karbürlerin oluşumunu teşviklendirmemesi nedeni ile düşük bir sertlik dağılımı gözlenmiştir.

Değişken toz kütle akış oranı ve 14 J'lük sabit atım enerjisinde yapılan deneylerin sertlik sonuçlarının gösterilmekte olduğu Tablo 5.8'den de görülebileceği gibi kaplama sertliğinin artışı toz kütle akış oranıyla değişmektedir. Yapılan sertlik testleri sonucunda en yüksek sertlik değeri 4 F numunesinde elde edilmiş olup 464 HV'dir. Ayrıca altlık malzemenin sertlik değeri ortalama olarak 269 HV olarak hesaplanırken kaplama tabakasının sertliği ise ortalama olarak 369 HV olarak hesaplanmıştır. Seyreklik parametresinin kaplama sertliği üzerindeki etkisine baktığımızda toz kütle akış oranı arttıkça seyreklik azalmış ve bundan dolayı kaplama tabakasının sertliği artmıştır. Yani seyreklik ile kaplama tabakasının sertliği ters orantılıdır. Seyreklik ve sertlik arasındaki değişim Şekil 5.22'de gösterilmiştir.



Şekil 5.22: Kaplama tabakasının sertliği ve seyreklik arasındaki ilişki.

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Toz enjeksiyonu yöntemi ile yapılan lazer kaplama baskın bir şekilde üstün bir yöntemdir. Çünkü bu metotta işlem parametrelerini kontrol etmek daha kolay ve daha esnektir. Kontrol edilebilen işlem parametreleriyle çeşitli kalınlıklarda kaplama tabakaları elde edilmiştir.

Haddelenmiş paslanmaz çelik alt tabakası üzerine kobalt temelli Stellite 6 tozunun enjekte edilerek lazerle kaplama deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu yöntemin tek kaplama tabakası elde etmek için uygun olduğu gözlemlenmiştir. Toz enjeksiyonu ile lazer kaplama metodu süresince, besleme tozunun bir kısmının alt tabakadan sekmesi ve alt tabakada oluşan ergiyik havuzundan parçacıkların sıçraması düşük verimin bir nedenidir. Kaplama numunelerinin hiç birinde herhangi bir çatlak gözlenmemiştir fakat bazı numunelerde koruyucu ve taşıyıcı argon gazının kaplama tabakası içine hapsolması nedeniyle gözeneklilikler meydana gelmiştir.

Çalışma sırasında, lazerlerin yapısı ve çalışma prensipleri, günlük hayatımızdaki yeri ve özellikle sanayide kullanım alanları incelenmiştir. Deneysel çalışmalar süresince kullanılan atımlı Nd:YAG lazeri üzerinde özellikle durulmuş ve avantajları irdelenmiştir. Kaplama malzemesi olarak Stellite 6 toz alaşımının seçilmesindeki en önemli neden metalik makine parçalarının yüzey sertliğini arttırmada, suyun ve oksijenin bulunduğu ortamlarda parçaları korozyona karşı korumada ve yüksek sıcaklığa maruz kalan parçaların aşınmaya karşı korunmasında son derece etkili bir toz alaşımı olmasıdır.

Kullanılan atımlı Nd:YAG lazerine ve toz besleme ünitesine bağlı parametreler olan atım enerjisi, atım frekansı, seyreklik ve toz kütle akış oranının kaplama kalitesine, kaplama yüksekliğine, mikroyapı ve mikrosertlik üzerine olan etkileri araştırılmıştır.

İncelenen sonuçlarda görüldü ki en ince kaplama tabakası 12 J'lük atım enerjisi, % 80'lik üst üste binme oranı ve 30 Hz'lik atım frekansı ve dakikada 12.2 gr toz kütle besleme oranıyla elde edilmiş olup yaklaşık olarak 244.6 mikrondur. En kalın kaplama tabakasına ise 12 J'lük atım enerjisi, %80'lik üst üste binme oranı, 45 Hz'lik atım frekansı ve dakikada 18.63 gr toz kütle akış oranıyla ulaşılmış olup yaklaşık olarak 1 mm'lik kaplama yüksekliği elde edilmiştir. Bu kaplama yüksekliği değerinde yaklaşık olarak % 24'lük bir seyreklik meydana gelmiştir. Kaplama tabakasının kalitesini etkileyen en önemli parametrenin seyreklik olduğu görülmüştür. Seyreklik değerinin artması hem kaplama tabakasının yüksekliğini hem de kaplama tabakasının mikroyapısını etkiler. Bu sebepten dolayı da seyreklik değişimi mikrosertlik değişimini direk olarak etkiler.

Lazer ile tozların etkileşimi sonrasında altlık malzeme üzerine düşen ergiyik damlacıkların birikimi sıvı fazın hakim olduğu ve belirli bir ıslatma açısında yüzeyi tamamen kaplayabilen bir tabaka oluşturmuştur. Kaplama tabakası sıvı-katı geçişinin bir yansıması olan dendritik katılaşmayı göstermektedir. Dendritik matrikste bazı yöreler ince dendritik morfoloji gösterirken bazı yörelerde ise daha kaba dendritler mevcuttur. Yöresel segregasyon ve soğuma farklılıkları bu tür bir oluşumu teşviklendirmektedir. Çoğunlukla ince dendrit morfolojisine sahip yöreler kaba olan yörelere kıyasla daha yüksek sertlik değerleri sunmuştur. İnterdendritik uzaylarda segregasyon elementlerinin veya yoğun empürite atomlarının varlığı soğuma koşulları ve çözünürlük faktörüne de bağlı olarak intermetalik esaslı çökelti fazının oluşumuna neden olacaktır. Kaplama-altlık malzeme arayüzeyine yakın konumda östenitik matrikste belirgin bir sertlik azalması belirlenmiştir. Bu yörelerde ısı girdisi nedenli olarak ikiz tane yapısı içeren östenitik matrikste tipik tane kabalaşması gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Malik, H., K., Singh, A., K., “Engineer Physics”, **Tata Mc Graw Hill Education Private Limited, New Delhi**, 4.1-4.13, (2010).
2. Steen, W., M., “Laser Material Processing”, **Springer-Verlag**, 2-11, (1991).
3. Silfast, W., T., “Laser Fundamentals”, First Edition, **Cambridge University**, 1-4, 82-190, 416-420, 449-454, (1996).
4. Hiçyılmaz, Ö., D., Şentürk, A., Keleş, A., Arıkan t., “Laser”, **Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi**, 199-207, 311-322, (1990).
5. Akman, E., “Ti6Al4V Titanyum Alaşımlarının Atımlı Nd:YAG Lazeri Kullanılarak Kaynak Edilmesi ve Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmit, 4-12, (2006).
6. Candan, L., “Karbon-Fiber Takviyeli Kompozitler ve Polikarbonat Malzemelerin Lazerle Delme Parametrelerinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmit, 4-16, (2008).
7. Wilson, J., Hawkes, J., “Optoelectronics”, Third edition, **Prentice Hall**, Essex, England, 169-178, (1998).
8. Schneider, M., F., “Laser cladding with powder”, Doktora Tezi, **University of Twente**, Enschede, The Netherlands, 17-50, 95-100, (1998).
9. Sun, S., Brandt, M., Harris, J., Durandet, Y., “The influence of stellite 6 particle size on the inter-track porosity in multi-track cladding”, **Surface & Coatings Technology**, 201, 998-1005, (2006).
10. Sun, S., Durandet, Y., Brandt, M., “Parametric investigation of pulsed Nd:YAG laser cladding of stellite 6 on stainless steel”, **Surface & Coatings Technology**, 194, 225-231, (2005).
11. Henry, M., Fearon, E., Watkins K., G., Dearden, G., “The laser cladding of Hastalloy to critical surfaces of stainless steel components”, **20TH ICALEO 2001**, Vols 92 & 93, Congress Proceedings 631-640, (2001).
12. Macintyre, R., M., “Laser Hardsurfacing of Gas Turbine Blade Shroud Interlocks”, **LIM-1**, 253-261, (1983).

13. Eboo, M., Lindemanis, A., E., “Advances In Lasercladding Technology”, **Proc. ICALEO '83**, SPIE, vol. 527, 86-94, (1983).
14. Bruck, G., J., “High Power Laser Beam Cladding”, **J. of Metals**, vol. 39, 10-13, (1987).
15. Lubbers, G., W., “Lasercladden op Inlaatkleppen en Nokkenstoters”, **Un. of Twente, Dept. of Mech. Eng.**, WA-371, (1994).
16. VandeHaar, et al., “Effect of Process Variables on the Laser Cladding of Zirconia”, **Proc. ICALEO '87**, 189-193, (1988).
17. Bruck, G.,J., “Fundamentals and Industrial Applications of High Power Laser Beam Cladding”, Laser Beam Surface Treating and Coating, **Proc. SPEI**, vol.957, 14-28, (1988).
18. Ritter, U., et al., “Laserbeschichten - In der Praxis bewährt”, **Technischen Rundschau Sulzer**, Winterthur, (3/1991).
19. Wissenbach, K., et al., “Surface Treatment of Car Engine Components with Laser Radiation”, **Proc. ISATA '91**, 333-341, (1991).
20. Gasser, A., et al., “Oberflächenbehandlung mit Zusatzwerkstoffen”, **Proc. ECLAT '96**, 287-298, (1996).
21. König, W., Rozsnoki, L., Kirner, P., “Laser Beam Surface Treatment - Is Wear No Longer The Bug Bear of Old”, **Proc. ECLAT '92**, 217-222, (1992).
22. Amende, W., “The Production of Wear-Resistant Zones on Tools by Means of the CO2 Laser”, **Proc. LIM-5**, 119-125, (1988).
23. Bergmann, H.W., et al., “Industrial Applications of Surface Treatments with High Power Lasers”, **Materials Science Forum**, vol. 163-165, 377-404, (1994).
24. Sexton, L., Lavin, S., Byrne, G., Kennedy, A., “Laser cladding of aerospace materials”, **Journal of Materials Processing Technology**, 122, 63-68, (2002).
25. Kathuria, Y., P., “Some aspect of laser surface cladding in the turbine industry”, **Surface & Coatings Technology**, 132, 262-269, (2000).
26. Richter, K., H., Orban, S., Nowotny, S., “Laser Cladding of the Titanium Alloy TI6242 to Restored Damaged Blades”, **Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics**, (2004).
27. Sarı, N., Y., Kaluç, E., Tülbentçi, K., “Alevle ısıp püskürtme uygulanarak Ç 1050 (C 45 E) çeliğinin abrazif + erozif aşınma davranışının iyileştirilmesi”, **Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi**, 177-178, (1999).

28. Tafralı, M., “Isıl Püskürtme Yöntemleri”, *Yüzey İşlem ve Kumlama Dergisi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 38-41, (2006).
29. Houck, D., L., “Thermal Spray: Advances in Coatings Techn.”, *Proceeding of the National Thermal Spray Conference*, Published by ASM, Orlando, Florida, USA, 367, 14-17 September (1987).
30. Elektrik Ark Püskürtme Prosesi [online], Sanal Sektör, http://www.sanalsektor.com/39772-ark_sprey.asp (Ziyaret tarihi: 10 Kasım 2009).
31. Ark Tel Püskürtme [online], ELKAP, <http://www.elkap.com.tr/arktelpuskurtme.php> (Ziyaret tarihi: 10 Kasım 2009).
32. Yıldız, T., Koç, A., Gür, A., K., “AISI 4142 Çeliğinin Elektrik Ark Kaynağı ile Yüzey Modifikasyonu Sonrası Aşınma Davranışının İncelenmesi”, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 19(3), 417-423, (2007).
33. Plazma Püskürtme [online], ELKAP, <http://www.elkap.com.tr/plazmapuskurtme.php> (Ziyaret tarihi: 10 Kasım 2009).
34. Sidney, S., Charschan, “Guide to Laser Materials Processing”, *Laser Institute of America*, 49-53, (1993).
35. Gür, A., K., Orhan, A., Çalığülü, U., “Ni/Ti Tozlarının PTA Yöntemiyle AISI 1020 Yüzeyindeki Kaplamalarının Mikroyapı Özellikleri”, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 23119, 125-131, (2008).
36. Çelik, H., “Co-Cr-Mo Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine V, Ti ve Mn Elementlerinin Etkisi”, *Fırat Üniversitesi 105M056*, 1-36, (2007).
37. Çömez, E., Çelik, H., “Kobalt Esaslı Elektrotlarla Kaplanan Malzemelerin İç Yapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *F. Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(4), 633-641, (2004).
38. Vollertsen, F., Partes, K., Meijer, J., “State of the art of Laser Hardening and Cladding”, *Proceedings of the Third International WLT-Conference on lasers in Manufacturing*, Department of Mechanical Engineering, Twente, Netherlands, 16-17, (2005).
39. Akdoğan, A., 2008, Süper Alaşımlar [online], Yıldız Teknik Üniversitesi, http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Super_Alasimlar.pdf (Ziyaret tarihi: 25 Aralık 2009).
40. Motorcu, A., R., “Nikel Esaslı Süper Alaşımların ve Titanyum Alaşımlarının İşlenebilirliği”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25 (1-2), 302-330, (2009).

41. Yalçın, B., Varol, R., “Sinterlenmiş Titanyum Alaşımlarının Aşınma Performansı ve Bazı Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 24 (1), 63-72, (2009).
42. Karaduman, B., Meydanoğlu, O., Kayalı, E., S., Çimenoglu, H., “Geleneksel Toz Metalurjisi Yöntemi ile Titanyum Matrisli Titanyum Karbür Takviyeli Kompozit Üretimi”, *5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09)*, Karabük Üniversitesi, Karabük, 13-15 Mayıs (2009).
43. Titanyum, Civata , Somun , Sac , Levha ve Tel Ürünleri [online], TİMED, www.timed.com.tr/tr/index.html (Ziyaret tarihi: 28 Aralık 2009).
44. Titanyum Alaşımlar [online], Birleşik Metal & Isıl işlem, <http://www.birlesikmetal.com.tr/index.asp?sayfa=titanyum> (Ziyaret tarihi: 28 Aralık 2009).
45. Nowotny, St., Scharek, S., Kempe, F., Beyer, E., “COAXn: Modular System of Powder Nozzles for Laser Beam Build-Up Welding”, *22nd International Congress on ICALEO*, Applications of Lasers & Electro-Optics, Jacksonville, Florida USA, 13-16 October (2003).
46. Gedda, H., Powell, J., Kaplan, A., *Proceedings of ICALEO*, vol. 94, Scottsdale, Arizona, USA, CD-ROM, (2002).
47. Frenk, A., Vandyoussefi, M., Wagnière, J., -D., Zryd, A., Kurz, W., “Analysis of the Laser –Cladding Process for Stellite on Steel”, *Metallurgical and Materials Transaction*, volume 28B, 501-508, (1997).
48. Ollier, B., Pirch, N., Kreutz, E., W., “Ein numerisches Modell zum Einstufigen Laserstrahlbeschichten”, *Laser und Optoelektronik*, vol. 274, no. 1, 63-70, (1995).
49. Qian, M., Lim, L., C., Chen, Z., D., Chen, W., L., “Parametric Studies of Laser Cladding Processes”, *Journal of Materials Processing Technology*, 63, 590-593, (1997).
50. Yang, W., F., “Laser Cladding Surface Treatment for Enhancement of Mechanical Properties”, Yüksek Lisans Tezi, *Peninsula Technicon Faculty of Engineering*, Cape Town, 50-52, (2003).
51. Kobalt [online], <http://www.turkcebilgi.com/kobalt/ansiklopedi>, (Ziyaret tarihi: 22 Ocak 2010).
52. “ASM Handbook, Welding, Brazing, and Soldering”, *The Materials Information Society*, USA, Volume 6, 789, (1993).

KİŞİSEL YAYINLAR

1. C. K. AKKAN, **S. BABUR**, E. KACAR, E. AKMAN ‘Optical Calculations and General Information For Laser Scanning Confocal Microscopy’, International Student Conference of Balkan Physical Union, August 2006, Bodrum - TURKEY.
2. **S.BABUR**, E.AKMAN, A. DEMİR ‘Nozzle For Laser Cladding, International Student Conference of Balkan Physical Union, August 2008, Bodrum - TURKEY.

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Diyarbakır’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 2002 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Fizik Bölümünden 2007 yılında fizikçi olarak mezun oldu. 2007 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Yüksek lisans öğrenimine başladı.