

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN LAZER İLE YÜZEY
SERTLEŞTİRME KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melih TARIM

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ekrem ALTUNCU

Aralık 2021

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN LAZER İLE YÜZEY
SERTLEŞTİRME KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melih TARIM

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM
DALI

Bu tez 21/12/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Doç. Dr. Ekrem ALTUNCU	Başarılı
Üye: Prof. Dr. Uğur ÖZSARAÇ	Başarılı
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Neslihan ÖZSOY	Başarılı

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim

Melih Tarım

28/11/2021

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Ekrem ALTUNCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanaklarını konusunda ve yardımları esirgemeyen SUMAR (Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Malzeme ve Üretim Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi) laboratuvar ekibine teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca araştırmalarımnda destek olan TÜYİDER (Tüm Yüzey İşlemler Derneği) derneğine teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmamda projemin tamamlanmasında emeği geçen Uniquetech Mühendislik firması çalışanlarına ve her daim yardımlarını esirgemeyen Sn. Osman KIRLI ve Prof. Dr. Okan ADDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR	v
SİMGELER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	ix
SUMMARY	x

BÖLÜM 1.	
LAZER YÜZEY PROSESLERİ.....	1

BÖLÜM 2.	
TERMAL YÜZEY SERTLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN LİTERATÜR	
TARAMASI.....	3
2.1 Lazer Sertleştirme veya Lazer Dönüşüm Sertleştirmesinin Tanımlanması	3
2.2 Lazer Sertleştirmenin Avantajları	5
2.3 Alevle Yüzey Sertleştirme.....	5
2.3.1 İşlem sırasında kullanılan makine özellikleri	6
2.3.2 Parça kalınlığına göre alev ayarı	7
2.3.3 Alevi yüzeye uygulama mesafesi	7
2.3.4 Tavlama ve ilerleme hızı	8
2.3.5 Alevle sertleştirme uygulanan malzemeler.....	9
2.3.6 Alevle sertleştirme avantaj ve dezavantajları	10
2.4 İndüksiyon ile Yüzey Sertleştirme	10
2.4.1 İşlem sırasında kullanılan elektrik akımı frekansı	11
2.4.2 Uygulama prensibi ve süresi.....	11

2.4.3 Soğutma sıvısı uygulama	11
2.4.4 İndüksiyon sertleştirmesinin uygulanan metaller	12
2.4.5 İndüksiyon sertleştirmesinin avantaj ve dezavantajları	13
2.5 Lazer Sertleştirmenin Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması	13
2.5.1 Lazer dönüşüm sertleşmesinin karbürizasyon ile karşılaştırılması	14
2.5.2 Nitrasyon ile lazer dönüşüm sertleşmesinin karşılaştırılması.....	14
2.5.3 Lazer dönüşüm sertleştirmesinin alevle sertleştirme ile karşılaştırılması	14
2.5.4 İndüksiyon sertleşmesiyle lazer dönüşüm sertleşmesinin karşılaştırılması....	15

BÖLÜM 3.

EKİPMAN VE İŞLEME PROSEDÜRÜ	18
3.1 Lazerler.....	18
3.1.1 Lazer ışınının yüzeylerle etkileşimi.....	19
3.1.2 Lazer emilimini artırmak için yüzey işlem	19
3.1.3 Sistemler ve ışın iletim optiği	20
3.1.4 Entegratörler, reflektif ve iletici	20
3.1.5 Tek ve iki boyutlu tarayıcılar.....	21
3.1.6 Kaleidoscope	21
3.2 Proses Parametreleri	22
3.2.1 Tarama hızı	22
3.2.3 Besleme oranı	23
3.3 Süreç prensibi	23
3.3.1 Lazer ısıtma ve sıcaklık döngüsü.....	26
3.3.2 Proses geliştirme.....	29
3.4 Modelleme.....	32

BÖLÜM 4.

PASLANMAZ ÇELİKLER	34
4.1 Paslanmaz Çelik Nedir?	34
4.1.1 Paslanmaz çeliklerin üstünlükleri.....	35
4.2 Paslanmaz çeliklerin türleri	35
4.2.1 Östenitik paslanmaz çelikler.....	36
4.2.2 Ferritik paslanmaz çelikler	37
4.2.3 Martenzitik paslanmaz çelikler.....	37
4.2.4 Ferritik-Östenitik (Dubleks) paslanmaz çelikler	37
4.2.5 Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler.....	38

BÖLÜM 5.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	39
5.1 Deneysel Çalışmalar.....	39
5.2 AISI 420(A Numunesi) Deney Sonuçları.....	40

5.3 AISI 431(B Numunesi) Deney Sonuçları.....45

BÖLÜM 6.
SONUÇ.....47

KAYNAKLAR49



KISALTMALAR

AISI	: American Iron And Steel Institute
CAD	: Computer Aided Design
CAM	: Computer Aided Manufacturing
Cm	: Santimetre
Dk	: Dakika
FEM	: Finite Element Analysis
HAZ	: Heat Effected Zones
HV	: Vickers Hardness
Hz	: Hertz
K	: Kelvin
kW	: Kilowatt
L	: Litre
Mm	: Milimetre
Ms	: Martenzitik Dönüşüm Başlangıcı
msn	: Milisaniye
Nd:YAG	: Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TTA	: Time-Temperature- Austenitization
TTT	: Time-Temperature-Transformation
W	: Watt

SİMGELER

μm	: Mikrometre
C	: Karbon
Co ₂	: Karbondioksit
Cr	: Krom
Fe	: Demir
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
Ni	: Nikel
P	: Fosfar
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum Karbür
TiC	: Titanyum Karbür
γ	: Östenit

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1: Frekansa bağlı sertlik derinlikleri.	11
Tablo 5.1: AISI 420 ve AISI 431 paslanmaz çeliklerin kalitesi.	39
Tablo 5.2: Lazer sertleştirme parametreleri.	40
Tablo 5.3: AISI 420 numunelere ait HV sertlik değerleri.....	41
Tablo 5.4: AISI 431 numunelere ait HV sertlik değerleri.....	45
Tablo 5.5: AISI 431 numunelerine ait HV sertlik değerleri.....	45
Tablo 6.1: Geleneksel fırın ile lazer sertleştirmenin AISI 420 paslanmaz çeliğin sertlik karşılaştırması.	47
Tablo 6.2: Geleneksel fırın ile lazer sertleştirmenin AISI 431 paslanmaz çeliğin sertlik karşılaştırması.	48

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1: Lazer sertleştirme örnekleri.	2
Şekil 2.1: Robot kabini (Uniquetech Mühendislik).	3
Şekil 2.2: Lazer sertleştirme oluşma düzeni.	4
Şekil 2.3: Alevle sertleştirme prensibi.	6
Şekil 2.4: Bilezik şekilde olan malzemenin alevle sertleştirilmesi.	6
Şekil 2.5: Farklı et kalınlıkları için farklı mesafelerde uygulanan alevle sertleştirme.	8
Şekil 2.6: Farklı parametrede uygulanan proses.	9
Şekil 2.7: İndüksiyon yöntemi ile yapılan sertleştirilen parçalar.	10
Şekil 2.8: Isıdan sonra su ile soğutulan indüksiyon prosesi.	12
Şekil 2.9: Dişliye uygulanan indüksiyon sertleştirilmesi.	12
Şekil 2.10: Isıtma şeklinin şematik gösterimi.	15
Şekil 2.11: Sertleşme bozulmasının karşılaştırılması.	16
Şekil 2.12: Bir deliğin yakınındaki bir bölgeye lazerle sertleştirme uygulanması örneği ...	17
Şekil 3.1: Erlas lazer sertleştirme başlığı.	18
Şekil 3.2: Işın entegratörü.	20
Şekil 3.3: Işın tarayıcı.	21
Şekil 3.4: Kaleidoscope.	22
Şekil 3.5: Yüksek güçlü Nd:YAG lazer sertleştirme (1045 Çeliği, 0.5 mm derinlikte).	23
Şekil 3.7: Fe-C faz diyagramı.	24
Şekil 3.8: Zaman-Sıcaklık-Östenit (TTA) sertlik diyagramı, soldaki C45, sağdaki 10Cr6.	26
Şekil 3.9: İş parçası yüzeyindeki sıcaklığın dönüşümü ve iç kısmı ile etkileşim zamanı. ...	27
Şekil 3.10: Lazer ışığı etkileşim süresinin ısıtma sırasındaki sıcaklık döngüsü üzerindeki etkisi ve farklı güç yoğunluklarında ve hareket hızlarındaki soğutma etkisi.	28
Şekil 3.11: Güç yoğunluğunun ve hareket hızının sertleşmeye etkisi.	29
Şekil 3.12: 42CrMo4 çeliğin sertleştirme diyagramı.	31
Şekil 3.13: Nd: YAG lazer sertleştirme şeması.	32
Şekil 4.1: Paslanmaz çeliklerin mikro yapıları.	34
Şekil 4.2: Cr ve Ni elementlerinin paslanmaz çeliklerin üzerinde etkisi.	36
Şekil 5.1: 5mm/s tarama hızındaki A1, A2 ve A3 numunelerin sertlik değerleri.	42
Şekil 5.2: 970 °C'de A1, A4 ve A5 numunelerin farklı hızlardaki sertlik değerleri.	42
Şekil 5.3: 1020 °C 'de A2, A6 ve A7 numunelerin farklı hızlardaki sertlik değerleri.	43
Şekil 5.4: Lazer ile sertleştirilen bölgelerin sertlik derinlikleri.	44
Şekil 5.5: A3 numunesinin SEM görüntüsü.	44
Şekil 5.6: AISI 431 numunelerinin lazer ile sertleştirilen bölgelerin sertlik derinlikleri.	46

MARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN LAZER İLE YÜZEY SERTLEŞTİRME KABİLEYETİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Martenzitik paslanmaz çelikler aşınmaya ve korozyona karşı dayanıklı, yüksek mukavemet gerektiren mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Örnek olarak buhar ve su vanaları, pompalar, vida makine parçaları, türbin gibi önemli sektörlere hitap eden alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Paslanmaz çeliklerin genel olarak çalışma ortamı korozyon, yorulma ve aşınma direncini etkilemektedir. Kullanılan malzemelerin çalışma ortamından kaynaklanan hasarlar malzemenin yüzeyinden aşınmaya başlamaktadır. Bu tür malzemeye zarar veren çalışma ortamlarına karşı mühendislik çözümleri, çalışan yüzeylerin kütlesini değiştirmeden mikro yapısında değişiklikler yapılarak çözüm üretilmesidir. Günümüzde geleneksel olarak kullanılan ısıtma işlem yöntemleri; alevle sertleştirme, indüksiyonla sertleştirme, karbonlama, nitrürleme gibi yüzey işlemleri çelik alaşımların aşınma direncini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemler karmaşık ısıtma işlem prosesleri, zaman ve enerji tüketimi, kontrol edilemeyen HAZ bölgesi ve soğutmak için gerekli ekstra bir işlem gerekmektedir. Lazer sertleştirme yöntemi ise geleneksel ısıtma işlem yöntemlerinin olumsuzluklarına karşı avantaj sağlamaktadır. Martenzitik paslanmaz çelikleri ferritik paslanmaz çeliklerine göre daha yüksek karbon içeriğine sahip Fe-Cr esaslı alaşımlardır. Yüksek karbon oranına sahip oldukları için hava, yağ ve suda sertleştirmek mümkündür. Son yıllarda malzemelerin ömrünün arttırılması ve malzemelerin iyileştirilmesi için lazer yüzey işlemleri öncülük etmektedir. Çoğu metalin kütle değişimi yapılmadan ve form yüzeyini bozmadan lazer sertleştirme işlemi yapılarak, malzemenin mikro yapısını değiştirerek iyileştirme yapılabilmektedir. Lazer sertleştirme yönteminde proses parametre değişkenleri ve malzemenin özelliğine göre farklı sonuçlar elde edilmektedir. Lazer sertleştirme günümüz proseslerinden indüksiyon ve alevle sertleştirmeden üstündür. Bu çalışmada 420 paslanmaz çeliğine farklı parametreler kullanılarak lazer sertleştirme parametreleri incelenmiştir. İşlem prosesinde lazer ışının güç yoğunluğu ve hareket hızı incelenerek, 420 paslanmaz çeliğin mikro yapısındaki değişimler, sertlik derinliği ve sertlikleri incelenmiştir. Yedi farklı parametre çalışması yapılarak numuneler üzerinde en verimli parametreler incelenmiştir. AISI 420 ve AISI 431 paslanmaz çeliklerine robotik ortam yardımıyla lazer sertleştirme yapılmıştır. Prosesi tamamlanan numuneler laboratuvar ortamında metalografi hazırlıkları yapılmıştır. Numuneler üzerinden HV mikro sertlik ölçümleri yapılarak en yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Bu numuneler SEM ortamında sertlik derinliği ve martenzitik bölgeler kontrol edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüzey sertleştirme, Lazer sertleştirme, Paslanmaz çelikler

LASER HARDENING PROCESS PARAMETERS EFFECT ON MARTENSITIC STAINLESS STEEL

SUMMARY

Martensitic stainless steels are widely used in many industrial engineering applications such as steam and water valves, pumps, screw machining parts, turbines which require high strength and high resistance to wear and corrosion. Failure of such stainless steel components due to corrosion, fatigue and abrasion, erosion is most likely to initiate from the surface. The engineering solution for minimizing or eradicating such surface-initiated failures lies in tailoring the surface composition or microstructure of the near surface region of a component without affecting the bulk. Conventionally, surface treatment processes like flame hardening, induction hardening, carburizing, nitriding, carbonitriding are usually employed in enhancing the wear resistance of steel alloys. These processes suffer from numerous restrictions: time and energy consumption, complex heat treatment schedule, non-controllable HAZ, lack of solid solubility limit, and the necessity of a quenchant. Laser hardening will obviate most of the restrictions observed in the conventional surface hardening treatments. Martensitic stainless steel grades are basically Fe-Cr based alloys with a higher carbon content than ferritics stainless steel group which enables them to harden on cooling in air, oil or water. Failure of such stainless steel components due to corrosion, fatigue and wear is most likely to initiate from the surface. The engineering solution for minimizing or eradicating such surface-initiated failures lies in tailoring the surface composition or microstructure of the near surface region of a component without affecting the bulk. In recent years, application of laser surface modification to prolong the service life of the engineering components is one of the most promising techniques for improving the surface resistance of the majority of steel alloys. In fact, these processes have been employed for improving the erosion and corrosion resistance of a number of ferrous alloys. Only martensitic grades of stainless steel contain sufficient carbon to be laser hardened. The degree of hardening is strongly dependent on the initial condition of the steel, as well as its chromium content. The aim of this study is to improve the surface hardness of 420 quality stainless steel with different laser hardening process parameters. However, it is tried to understand process-property relationships. In recent years, application of laser surface modification to prolong the service life of the engineering components is one of the most promising techniques for improving the surface properties of the majority of metals. Surfaces can be treated with a laser beam to modify their surface properties. The laser beam subjects the near-surface to a thermal transformation with an amplitude and shape which depends on the process variables: the beam size, energy, scan rate and on whether the laser is pulse or continuous, and the chemistry and metallurgy of the steel. In this study, different laser hardening process parameters effect on hardening depth and hardness of AISI 420 ve AISI 431 stainless steels are investigated. As a result of the contact of the laser with the surface martensitic transformation takes place.

Keywords: Surface Hardening, Laser Hardening, Stainless Steels

BÖLÜM 1. LAZER YÜZEY PROSESLERİ

Lazerler, 20. yüzyılın en önemli buluşlarından biridir. Gelişmeler sonucu oldukça yoğun, tek renkli, uyumlu ve polarize edilmiş ışık dalgası elde edilmiştir. İlk lazer 1960 yılında Kaliforniya laboratuvarlarında kullanılmaya başlanmıştır. Lazer, o yıllarda elmaslara delik açmak için kullanılan ilk endüstriyel uygulamasıdır. Lazer metal işlemenin düşük işleme yeteneği ve farklı koşullarda oluşan dengesizlikler nedeniyle başarılı olamamıştır. Bu başarısızlıklar yeni lazer kaynak türlerinin geliştirmesine yol açmıştır. Mühendislik uygulamaların en büyük yeri lazer cladding ve lazer sertleştirmedir.

Günümüz sektöründe kullanılan çelik alaşımların çoğu yüksek kromlu paslanmaz çeliklerdir. Çalışma ortamlarında korozyon direncini arttırmak amacıyla kullanılan paslanmaz çeliklerin aynı zaman yüksek aşınma direnci için birçok modifikasyonlar yapılmaktadır. En hızlı çözüm olarak ise malzemeyi çalışma ortamına göre sertleştirmektedir. Paslanmaz çeliklerin kimyasal içeriğinden dolayı sertleştirme sonrasında malzeme gevrekliği fazla olduğundan dolayı malzeme üzerinde mikro çatlaklar oluşmaktadır. Fırın yöntemlerinde paslanmaz çeliklerin sertleştirilmesi gevreklik problemlerinden dolayı sınırlı kalmaktadır. Alevle ya da indüksiyon ile sertleştirme işlemleri kontrol edilebilirliği zor olması sebebiyle ve soğutma için ayrı bir proses gerektirdiği için gerekli istenen şartlar sınırlı kalmaktadır.

Lazer sertleştirme prosesinde hacimsel sertleştirme yapılmamaktadır. Sadece malzemenin çalışan yüzeylerine bağlı kalarak işlem yapılmaktadır. İşlem yapılan bölgeler bilgisayar ortamında üstün hassasiyetle kontrol edilerek parametreler girilmektedir. Paslanmaz çeliklerin ısı işlem sırasında en büyük problemleri kalıntı ferritlerin martenzitik bölgesine bağlı kalmasıdır. Bu süreç malzemenin mukavemetini ve sertliğini düşürmektedir. Ferrit yapıları minimuma indirildiğinde malzeme yüzeyinde çatlaklara yol açmaktadır. Lazer sertleştirme prosesi üstün kontrol edilebilirliği ve homojen bir mikro yapı verdiği için dolayı yüksek sertlik ve yüksek mukavemet sağlamaktadır. Lazer

sertleştirme sonucunda malzeme üzerinde herhangi bir soğuma prosesi yapılmamaktadır. Malzemenin kendi ısı iletkenliği kullanılarak soğuma gerçekleşecektir. Diğer yöntemlere göre zaman olarak çok hızlı olmaktadır. Sadece lokal olarak yapılan lazer sertleştirme sonucunda kompozit bir yapı gibi davranış gösterecektir. 1 ila 1.2 mm sertlik derinliği altında kalan düşük sertlikteki ana malzeme darbe ile çalışma ortamlarında gevrek olan malzemenin kırılmasını engelleyecektir. Lazer sertleştirme yüksek sertlik, yüksek mukavemet ve yüksek aşınma direncinin yanında malzeme ömrünü uzatacak tasarıma sahip olacaktır. Şekil 1.1’de lazer sertleştirme yapılan örnekleri görebilirsiniz.



Şekil 1.1: Lazer sertleştirme örnekleri.

BÖLÜM 2. TERMAL YÜZEY SERTLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN LİTERATÜR TARAMASI

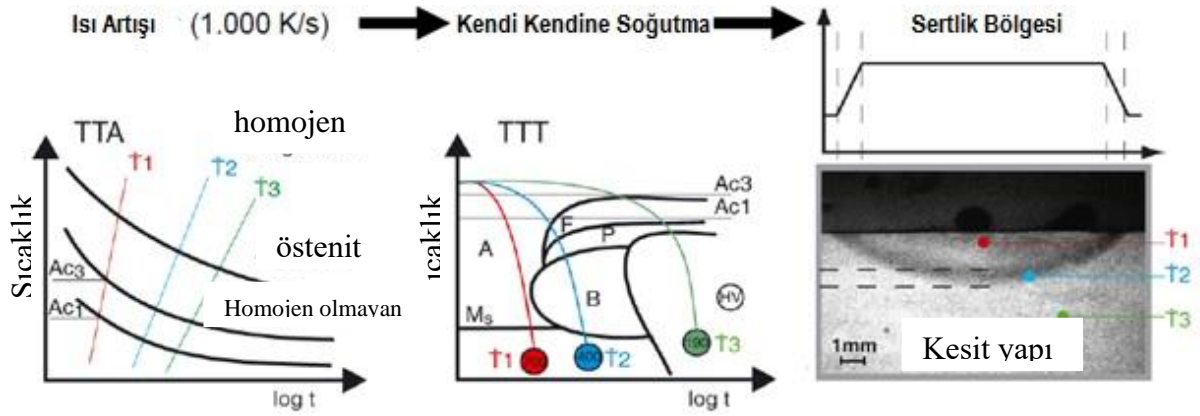
2.1 Lazer Sertleştirme veya Lazer Dönüşüm Sertleştirmesinin Tanımlanması

Genel olarak ismi lazerle ısıl işlem olarak adlandırılmıştır. Ancak birçok farklı ısıl işlem sürecini kapsamaktadır: Stres giderme, normalizasyon, tavlama, temperleme, martemperleme, ve östemperlemedir. Bu yüzden terim olarak lazer dönüşüm sertleştirme tercih edilir. Proseslerin uygulandığı robot kabini Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Robot kabini (Uniquetech Mühendislik).

Lazer sertleştirme, demir esaslı malzemelerde %0,2 C üzerindeki Fe-C alaşımlarına uygulanan yüzey sertleştirme işlemidir. Sertleşme yapılacak malzeme üzerine yüksek enerji yoğunluğuna sahip lazer ışını uygulanmaktadır. Dış düzeyde ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta 900-1400 derecede saniyede 1000 K sıcaklık artış ile işlem gerçekleştirilir. Malzemenin yüzeyi ile çekirdek bölgesi arasında ısı farkı oluşmaktadır. Uygulanacak çalışma sıcaklığında lazer yüzeyde sabit hızda ve mesafede hareket etmektedir. Lazer hareket etmesiyle yüzey homojen olmakla birlikte sürekli çalışma sıcaklığında ısıtmaktadır. Yüzeyde oluşan sıcaklık değişimi etkisiyle demir atomların kristal yapısı bozulmaktadır. Bu duruma östenitleme işlemi denir. Çalışma sıcaklığında lazer ışınının yüzeyden geçmesi ile ısınan bölge kendi kendini hızlı bir şekilde soğutmaktadır. Geleneksel ısıl işlem yöntemlerinde kullanılan hava, su veya yağ gibi ekstra soğutmaya gerek duyulmamaktadır. Hızlı soğuma sonucu kristal yapı ilk haline dönmesini engelleyecektir ve böylece çok sert olan martenzit kristal yapısı oluşacaktır. Sertleşme derinliği genel olarak 0.1 – 2 mm aralığındadır. Bazı malzemelerde, alaşım kompozisyona bağlı olarak 2.5 mm ve üzerinde olabilmektedir. Çeşitli farklı boylarda optik yardımcıları kullanılarak lazer ışını genişliği 60 mm'ye kadar tarayabilmektedir. Lazer sertleştirme prosesinin ana adımları Şekil 2.2'de gösterilmiştir (URL-1).



Şekil 2.2: Lazer sertleştirme oluşma düzeni (Roland,2016).

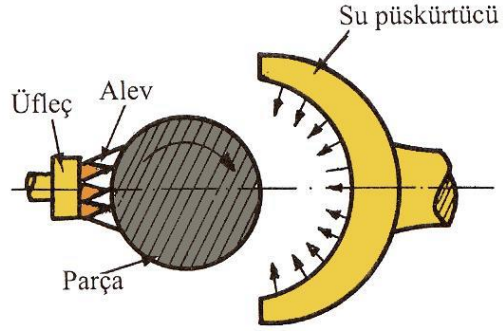
2.2 Lazer Sertleştirmenin Avantajları

Lazer sertleştirmenin en önemli avantajı, kontrol edilebilirliğidir. Işık yoğunluğu ve ısıtma süresi büyük bir hassasiyetle kontrol edilebilir ve kesin olarak herhangi bir alanı kapsayacak şekilde şekillendirilebilir. Homojen ısı dağılımı sonucu aynı zamanda homojen iç yapı da elde edilir. İç yapının düzenli, homojen ve küçük taneli oluşu, yüksek sertliklerde oluşan gevreklik problemini de ortadan kaldırır. İşlem sonucu ulaşılabilecek sertlik değeri malzemenin karbon içeriği ile doğrudan ilgilidir.

Lazerin temas ettiği yüzeyde sıcaklık artış hızı çok yüksek olduğu için malzemenin geneline etki eden ısı yük düşüktür. Bu nedenle şekil deformasyonu minimum düzeydedir. Ürünün sadece sertlik alması istenen bölgelerine işlem yapılmasına olanak sağladığı için lazer yüzey sertleştirme, hem parçanın geri kalan kısmının gereksiz yere işleme dahil olmasının önüne geçer. Lokal sertleştirme sayesinde, büyük parçalar için işlemin ekonomik olması anlamına da gelir. Çok küçük boyutlara ve küçük kütleye sahip olsa bile, çalışacak ölçülere getirilmiş bir ürün, lazer ısıtma işlemi sonrası herhangi bir işleme gerek duyulmadan çalıştırılabilir. Bu da üretim süresince önemli bir zaman ve işçilik tasarrufu anlamına gelir (Roland, 2016).

2.3 Alevle Yüzey Sertleştirme

Alevle yüzey sertleştirme, gaz üfleçleri yardımı ile sertleştirilmesi istenilen yüzeyin ısıtılması ve uygun soğutma ortamlarında ani soğutulması işlemidir. Burada yanıcı gaz olarak çoğu kez asetilen ve likit petrol gazı (LPG), bunların yanında hava gazı, doğal gaz, metan ve propan gibi gazlar kullanılır. Yakıcı gaz olarak en yaygın olarak oksijen gazı kullanılır. Yakıcı gaz oksijen ve yanıcı gazlardan birinin beraber kullanılarak elde edilen alev üfleç aracılığı ile malzeme yüzeyine tatbik edilerek ısıtma işlemi sağlanır. Soğutma işlemi ise genellikle su, suyun yanı sıra tuz çözeltisi ve hava kullanılarak yapılır. Isıtma ve soğutma işlemleri yüzey sertleştirme yapılacak çelik malzemenin ebatlarına ve kimyasal özelliklerine göre farklılık gösterir.



Şekil 2.3: Alevle sertleştirme prensibi (MEB, 2011).

2.3.1 İşlem sırasında kullanılan makine özellikleri

Yüzey sertleştirmede kullanılan ısı sağlayıcı makineler, çalışma prensibi açısından oksijenli asetilen kaynağında kullanılan sistemle aynı özelliğe sahiptir. Yüzey sertleştirme işleminde bu iş için geliştirilmiş üfleçler (özel sertleştirme otomatları) kullanılır. Yani üfleçlerin ortaya çıkardıkları ısı, iş parçasının çok kısa süre içinde tavlmasını sağlamalıdır. Soğutma aparatı ısıtma üfleci ile yan yana hareket eder. Bir taraftan ısıtma sağlanırken hemen ardından soğutma işlemi yapılır.



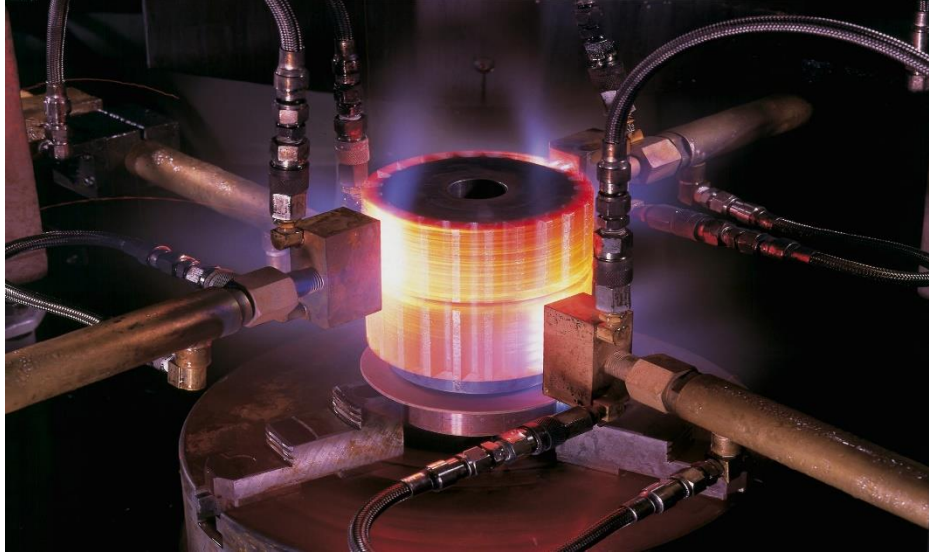
Şekil 2.4: Bilezik şekilde olan malzemenin alevle sertleştirilmesi.

2.3.2 Parça kalınlığına göre alev ayarı

Alevle sertleştirme işleminde ihtiyaç duyulan ısı oksijen alevinden sağlandığı gibi alev başka bir cihaz yardımıyla da elde edilebilir. Parça yüzeyine uygulanan alev parça kalınlığına göre uygun olmalıdır. İnce kesitli parçalara uygulanacak alev, kalın kesitli parçalara uygulanacak alevle göre daha az olmalıdır. Sertleşme derinliği, üfleç alevine ve parçanın kalınlığına bağlı olarak değişir. Uygulanan üfleç alevine göre parça kalınlığı düşükse ısıtılan malzemenin çekirdeğinde ısınma meydana gelebileceğinden sertleşme derinliği daha büyük olur. Buna göre parça kalınlığı yaklaşık sertleşme derinliğinin en az 4 katı olmalıdır.

2.3.3 Alevi yüzeye uygulama mesafesi

Alev, sertleştirilecek malzeme yüzeyine uygun mesafede uygulanmalıdır. Malzeme kalınlığı da alevin uygulanma mesafesini değiştirir. Örneğin, kalın kesitli bir malzemeye alev uzun mesafede tatbik edilirse malzeme yüzeyi tam anlamıyla tavlama olmaz. Farklı bir şekilde, çok ince kesitli bir malzemeye alev, gereğinden yakın tutularak tatbik edilirse aşırı tavlama meydana gelecektir. Bu sebeple alev parça kalınlığına ve malzeme özelliğine göre normal mesafede yüzeye tatbik edilmelidir. Sertleştirilecek malzemenin yüzeyinde homojen bir (bütün yüzeyde aynı oranda) tavlama sağlamak için alev, malzemenin bütün yüzeyine aynı mesafe ve oranda tatbik edilmelidir. Elle çalıştırılan aletlerle yapılan ısıtmada, parçaların aşırı ısınmasını önlemek için beceri ve deneyim gerekir. Alevle sertleştirmede alev yüzeye hareketsiz, ileri hareketli, dönme hareketli ve dönme-ileri hareketli olmak üzere dört değişik yöntemle yapılabilir. Hareketsiz yöntemde parça ve üfleç hareketsizdir.



Şekil 2.5: Farklı et kalınlıkları için farklı mesafelerde uygulanan alevle sertleştirme.

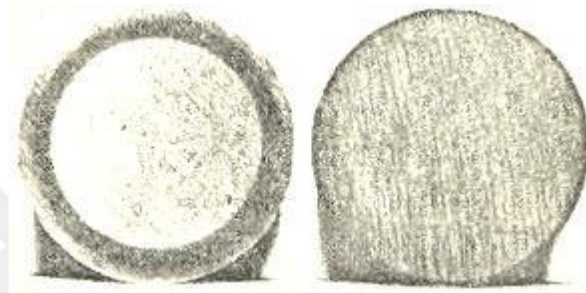
Bu yöntem vana sistemi ve açık ağızlı anahtarlar gibi küçük parçaların bazı noktalarının sertleştirilmesinde kullanılır. Hareketli yöntemde, oksijen asetilen üfleci hareketli, parça hareketsizdir. Üfleç, hareketsiz parçanın üzerinde hareket eder. Bu yöntem, torna tezgâhı parçaları gibi büyük parçaların yüzeylerinin sertleştirilmesinde uygulanır. Ayrıca büyük dişli çarkların dişlerinin sertleştirilmesinde de kullanılabilir.

Dönme hareketli yöntemde, oksijen asetilen üfleci hareketsiz olup parça döndürülür. Bu yöntem, hassas dişliler, kasnak ve makara gibi dairesel kesitli parçalara uygulanır. Dönme-ileri hareketli yöntemde hem üfleç hem parça hareketlidir. Üfleç dönen parçanın üzerinde hareket eder. Bu yöntemle mil ve merdane gibi uzun silindirik parçaların yüzeylerinin yüzey sertliği yapılır.

2.3.4 Tavlama ve ilerleme hızı

Bu işlem için en önemli şey iş parçasının üfleç ile tavlanaabilecek bir biçimde olmasıdır. Parça yüzeyine uygulanacak tav dereceleri iş parçasının yapısına göre farklılıklar gösterir. Dolayısıyla sıcaklık ayarlanırken sertleştirilmesi istenilen gerecin kimyasal yapısı bilinmelidir. Alev ile sertleştirmede üflecin oluşturduğu sıcaklık direkt olarak malzemenin üst yüzeyini ısıtır. Uygulamalarda elde edilen sıcaklık 3000 °C'ye kadar çıkar. Bu da malzemelerin kısa sürede tavlanamasına neden olur. Tavlama her zaman dönüşüm sıcaklığı olan 723 °C'nin üzerinde olmalıdır. Çünkü bu sıcaklığın altındaki

tavlama derecelerinde sertleşme oluşmaz. Alevin ilerleme hızı parça kalınlığına ve elde edilen alevin şiddetine bağlı olarak değişir. Örneğin, sertleştirme yapılacak bir iş parçası için hazırlanan alev gereğinden daha hızlı bir şekilde yüzeye tatbik edilirse malzeme yüzeyinde normal ısınma (tavlama) olmayacağından soğutma esnasında istenilen sertleşmenin oluşması mümkün olmayabilir. Eğer malzemeye uygulanan alevin ilerleme hızı, malzeme kalınlığına göre gereğinden çok düşük olursa malzemenin iç yapısında doğrudan ısınma olacaktır. Soğutma esnasında bu iç yapılarda da sertleşme meydana gelir.



Şekil 2.6: Farklı parametrede uygulanan proses (MEB, 2011).

Hâlbuki daha önce de anlatıldığı gibi yüzey sertleştirmede amaç, malzeme iç yapısının aynı özellikte tutulup sadece yüzeyinin sertleştirilmesidir. Ani soğutma ile ulaşılabilecek sertleşme derinliği 3 ile 6 mm arasında bir değerde oluşabilir. Bu oranın daha düşük olması, üfleç hızına ve üfleçle geçiş arasında bırakılacak mesafeye bağlıdır.

2.3.5 Alevle sertleştirme uygulanan malzemeler

Alevle yüzey sertleştirme uygulanan metalleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür;

- Genellikle içerisinde %0,40 ile 0,80 oranında karbon bulunan çelikler
- Fırınlarda ve ocaklarda yüzey sertleştirmesi mümkün olmayan malzemeler
- Krom-nikelli ve krom-molibdenli gibi katı çelikler
- Bileşiminde, bileşik karbon oranı %0,50'den aşağı olmayan kır dökümler
- Yüksek mukavemetli ıslah çeliklerine ait malzemeler

2.3.6 Alevle sertleştirme avantaj ve dezavantajları

Alevle yüzey sertleştirmenin avantaj ve dezavantajlarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

➤ Avantajları

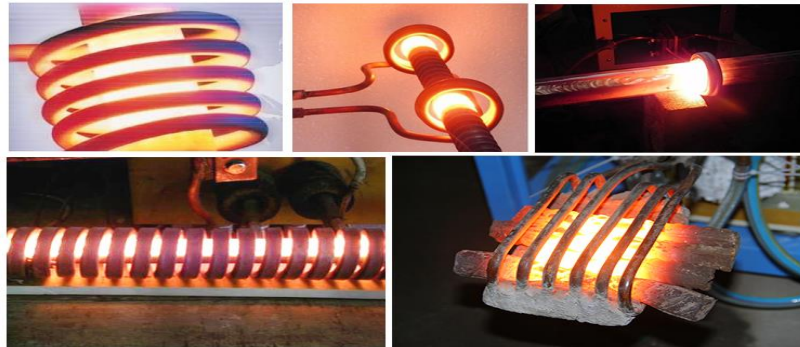
- Büyük ölçekli parçalara rahatlıkla uygulanabilir.
- Belirli şartlar altında oldukça ekonomiktir.
- İşlem sonrası malzeme yüzeyinde karıncalanmalar (pürüzlülük) oluşmaz.
- İşlem uygulanan malzemenin çekirdek ve kimyasal yapısı korunmuş olur.
- Malzemede çarpılma ve yamulmalar çok az olur.

➤ Dezavantajları

- Çok sayıda parçalara uygulanırsa (seri iş) pahalı bir yöntemdir.
- Yüksek karbonlu ve kaba kesitli çelik malzemelere yüzeyde çatlama oluşabileceğinden uygulanmaz.
- Bazı parçalarda bütün yüzeyi homojen olarak tavlama güç olabilir.

2.4 İndüksiyon ile Yüzey Sertleştirme

Elektrik akımından yararlanarak parçaların ısıtılıp ani olarak soğutulması indüksiyon akımı ile yüzey sertleştirme işlemi olarak adlandırılır. Bu yöntemin, alevle yapılan yüzey sertleştirmeye göre farkı, ısının elektrik enerjisinin dönüşümü ile parça yüzeyine tatbik edilmesidir.



Şekil 2.7: İndüksiyon yöntemi ile yapılan sertleştirilen parçalar.

2.4.1 İşlem sırasında kullanılan elektrik akımı frekansı

Elektrik akımı yüksek frekans üretebilen devreden alınan alternatif akım yük sargısı (bobin) ile malzeme yüzeyi ısıtılır. Genel olarak uygulamalarda seçilen frekans 10.000-500.000 Hz değerleri arasındadır. Parça yüzeyine uygulanan frekans ve buna bağlı olarak sertleşme derinliği aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Frekansa bağlı sertlik derinlikleri (Soy, 2014).

Frekans (Hz)	Elektrik enerjisinin girme derinliği (mm)	Sertleşme derinliği mm
1.000	1,50	4,60-8,90
3.000	0,90	3,80-5,10
10.000	0,50	2,50-3,80
120.000	0,15	1,50-2,50
500.000	0,08	1,0-2,0
1.000.000	0,05	0,25-0,75

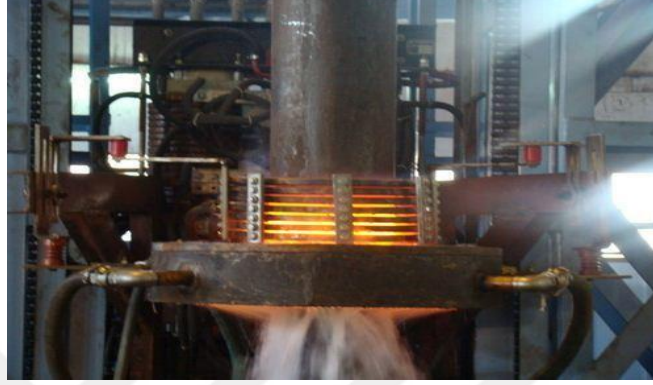
2.4.2 Uygulama prensibi ve süresi

İndüksiyon akımı ile yüzey sertleştirme işleminde alternatif akım yük sargısı, ısıtılacak yüzeyi sıkıca sarar. İşlem yapılacak parçayı saran bobinlerin içerisinden yüksek frekanslı alternatif akım geçirilerek yüksek frekanslı bir manyetik alan elde edilir. Oluşan yüksek frekanslı akımlar metalin yüzeyinde hareket eder. Metalin bu akımlara karşı gösterdiği direnç nedeniyle parça yüzeyi ısınır. Burada elektrik direkt olarak parçaya verilmez. Parçayı saran yük sargısına (bobine) verilir. Bu sayede indüksiyon yolu ile parçanın yüzeyinde elektrik akımı meydana gelir ve yüzey birkaç saniye içerisinde sertleştirme (su verme) sıcaklığına ulaşır. Isınmanın bu birkaç saniyeden fazla tutulması, parçanın iç yapısının da ısınmasına sebebiyet verir. Bu sebeple ısıtma süresi iyi ayarlanmalıdır. Herhangi bir frekansta, ısıtma süresi parçaya göre uzatılarak sertleşme derinliği artırılabilir.

2.4.3 Soğutma sıvısı uygulama

İndüksiyon akımı ile yüzey sertleştirme, genellikle bu işlem için üretilmiş makineler aracılığı ile yapılmaktadır. Günümüzde kullanılan yeni teknolojik makinelerin çoğu

parçayı aniden ısıtıp parçayı çıkarmadan aynı anda ani olarak ısınan yüzeye soğutma sıvısı uyguluyor. Bu sayede sertleştirme işlemi gerçekleştiriliyor. Bunun yanında ısınan parça yerinden çıkarılarak da soğutma işlemine tabi tutulabiliyor. İndüksiyonla ısıtmadan sonra, ani soğutma genellikle su ile yapılır. Gerilmeleri ve çatlama için engellemek için 50-60 0C sıcaklığında su, tuz ya da yağ banyosu kullanılabilir.



Şekil 2.8: Isıdan sonra su ile soğutulan indüksiyon prosesi.

2.4.4 İndüksiyon sertleştirmesinin uygulanan metaller

İçerisinde %0,35 ile %0,60 oranında karbon bulunan, orta karbonlu çelikler, endüksiyon akımı yöntemi ile yüzey sertleştirmeye tabi tutulur. Genellikle motor kranklarının ana yatak muylusu, uzun miller, dişliler ve kamaların yüzeyleri genelde bu yöntemle sertleştirilir.



Şekil 2.9: Dişliye uygulanan indüksiyon sertleştirilmesi.

2.4.5 İndüksiyon sertleştirmesinin avantaj ve dezavantajları

1. Avantajları

- Endüksiyonla yüzey sertleştirmede, malzemenin ısınma süresi çok düşük olduğundan çevrenin ısınması çok azdır.
- Bu yöntem ile parça kısa sürede ısındığından etrafa gaz yayılmaz ve daha temiz çevre sağlanır.
- Küçük tesislerde bile kullanılabilir.
- Sürekli bir üretim (seri üretim) için kullanılmaya çok uygundur.
- Alevle sertleştirmeye oranla daha yüksek ısı girişi sağlanır.
- Elektrik ortamında otomatik kontrol sayesinde ısıtma daha iyi ayarlanır.
- Parçaların seri imalatında zaman ayarı, elektriksel olarak yüzeye tatbik edilen sıcaklığın ve nüfuz derinliğinin otomatik olarak ayarlanması oldukça kolaydır.

2. Dezavantajları

- En büyük dezavantajı elektrik üretimi ve ayarlama aletleri gerekli olan tesis oldukça masraflıdır.
- Sargıların imal edilmesi ve geliştirilmesi oldukça pahalıdır.
- Karmaşık sargıların gerektiği durumlarda parça sayısı çok az ise sertleştirme maliyeti çok artar.
- Nitelikli (yetiştirilmiş) işçiye ihtiyaç duyulur.
- Malzeme seçimine sınırlama getirir.
- Düşük karbon miktarlı parçalarda diğer yöntemle ulaşabilen sertlik değerlerine ulaşamaz, yüksek karbonlu çeliklerde ise çatlama tehlikesi meydana çıkar.
- Keskin kenar ve köşeli parçaların bu bölgelerinde aşırı ısınmalar meydana geleceği için güçlükler oluşur.

2.5 Lazer Sertleştirme Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması

Lazer dönüşüm sertleşmesi, lokal sertleştirme işlemidir. Lokal sertleştirme işlemlerinin iki sınıfı vardır: difüzyon yöntemleri ve sertleştirme yöntemleridir. Karbürleme ve nitrürleme gibi difüzyon yöntemleri, bir çeliğin yüzey bileşimini sulama sonrası sertliği ana malzemenin sertliğinden daha fazla olacak şekilde değiştirir. Alev, indüksiyon ve

lazer gibi sertleştirme yöntemleri, lokalize bir alana ısı uygulayarak östenit yapı oluşturur ve soğumanın üzerine yüzey sertleşir.

2.5.1 Lazer dönüşüm sertleşmesinin karbürizasyon ile karşılaştırılması

Karbürleme, düşük karbonlu çeliklere uygulanır. İş parçası 800 ila 1000 ° C arasında tutulur ve karbon yüzeye yayılır. Karbonu emdirme gaz, katı veya sıvıdan sağlanır. Karbürlenmemesi gereken alanlar, bu bölgelere karbonun difüzyonunu önlemek için maskelenmelidir ve maskeleme materyali daha sonra çıkarılır. İşlem derinliği, zaman ve sıcaklık ile kontrol edilir. Sertleşme, tüm parçanın söndürülmesiyle sağlanır; yüksek karbonlu bölgeler, içeriden veya maskelenmiş yüzeylerden çok daha yüksek sertliğe ulaşır. Bir parçanın tüm yüzeyi sertleştirilecekse, karbonlama işlemi, lazerle sertleştirmeye tercih edilir. Lazer dönüşüm sertleşmesi, bir iş parçasının lokal alanlarını sertleştirmek için daha iyidir çünkü lazer işleminde zaman alan maskeleme sürecine gerek duyulmaz.

2.5.2 Nitrasyon ile lazer dönüşüm sertleşmesinin karşılaştırılması

Karbürleme gibi, nitrürleme de çeliğin yüzeyini sertleştirir ve ana malzeme sertliğinden daha sert olur. Nitrasyon, genel olarak alüminyum veya krom ile alaşımlanmış çeliklere uygulanır (paslanmaz çeliklere de uygulanır fakat korozyon direnci azalır) ve söndürme gerektirmeden son derece sert bir yapı oluşturur. Parça derinliği nitrürleme fırınında tutulmadığı sürece yapının derinliği oldukça azdır. 24 saatlik bir bekleme süresi, 300 µm civarında bir yapı derinliği oluşturur.

Difüzyon prosesi olarak nitrürleme, istenilen sertleşmek için maskeleme gerektirir. Sertleştirilmiş paslanmaz çelik için iyi bir uygulamadır ve nitrürlenmiş yüzeylerin mükemmel aşınma direnci vardır. Lazer dönüşüm sertleşmesine kıyasla, nitrürleme yavaştır ve makul zamanda yapı içinde derinliğe inemez.

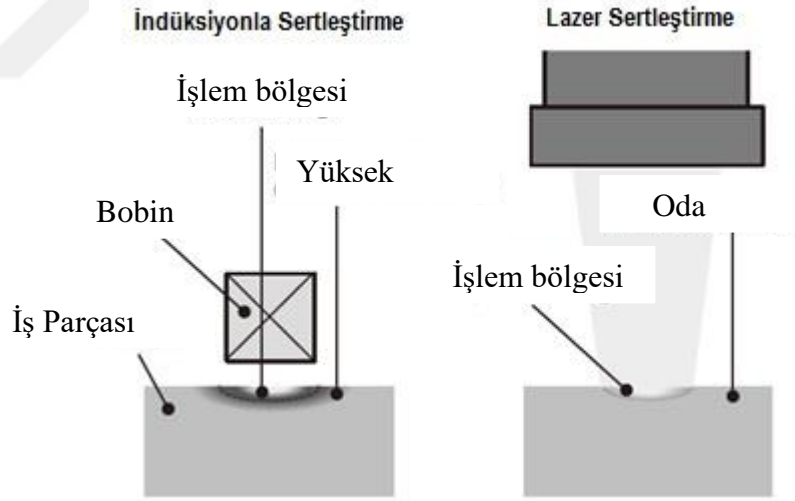
2.5.3 Lazer dönüşüm sertleştirmesinin alevle sertleştirme ile karşılaştırılması

Alevle sertleştirme lazer sertleşmesine çok benzer, ancak lazer de daha düşük toplam ısı girişi ve daha hızlı bir termal döngü ile birim alan başına daha fazla güç uygulayabilir. Her iki proste, çelik yüzeyinde ısıtma meydana gelir; kasanın derinliği çelik ısı dağılımı

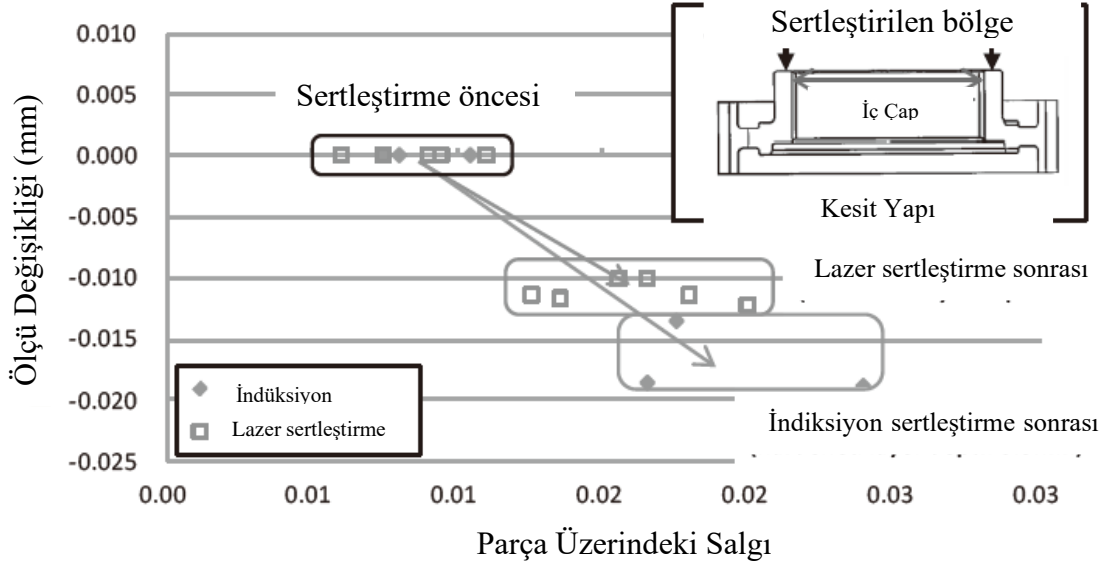
ile kontrol edilir. Alevle sertleştirme, lazerlere kıyasla çok daha ucuzdur ancak ısı girdisi ve ısıtma alanı kontrolü daha azdır. Alevle sertleştirmede güç ve konumu tekrarlayarak uygulamaya sokulabilir, ancak lazer kullanımı o kadar maliyetli değildir.

2.5.4 İndüksiyon sertleşmesiyle lazer dönüşüm sertleşmesinin karşılaştırılması

Birincisi, lazer sertleştirme, sertleşme bozulmasını azaltmada ve sertleşme çatlaklarını önlemede etkilidir, çünkü indüksiyon sertleştirmesinden çok daha küçük bir alanı ısıtarak sertleştirilebilir. İndüksiyon sertleşmesi ve lazer sertleşmesinin şeması Şekil 2.10'da gösterilmektedir. İndüksiyonlu ısıtma durumunda, bobinin yakın kısmı en çok ısıtılır ve ısıtma gücü bobinden uzaklıkla kademeli olarak zayıflar. Bu nedenle, sertleştirme gerektiren alanın çevresinde daha geniş bir bölüm de yüksek bir sıcaklığa ısıtılır. Lazer sertleşme durumunda sadece lazer spot ışığı ile ışınlanan ürün yüzeyi ısıtılır ve 0,1 saniye zaman ölçeği ışınlanması esnasında ısı iletimi çok düşük olur.



Şekil 2.10: Isıtma şeklinin şematik gösterimi (Sindo, 1983).

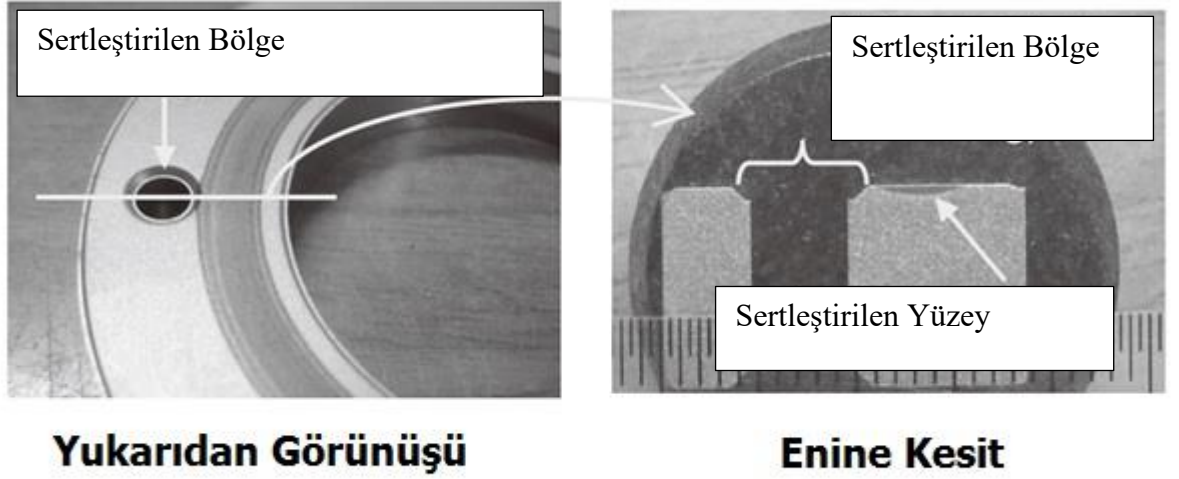


Şekil 2.11: Sertleşme bozulmasının karşılaştırılması (Sindo, 1983).

Lazerle sertleştirme ve indüksiyon sertleştirilmesi arasındaki sertleşme distorsiyonunun karşılaştırma sonucu Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Lazerle sertleşen uygulama parçalarının sertleşme distorsiyonu, aynı sertleştirilmiş tabaka derinliğinde bile indüksiyon sertleştirmesinden daha küçüktür. İkincisi, lazerle sertleştirme, diğer yöntemlerle sertleşmesi zor bir parçanın bir kısmı için geçerlidir.

Örneğin, sertleşmeye ihtiyaç duyulan alanların sertleşmeye izin verilmeyen bölgelere çok yakın olduğu şekillerde bir indüksiyon bobininin kullanılması zordur. Sertleştirmeden sonra işlenmesi gerektiren bir deliğin yakınındaki kısmına lazerle sertleştirmenin uygulanması örneği Şekil 2.12'de gösterilmektedir.

Bu gibi seçici kısmi sertleştirmeler, geleneksel indüksiyon sertleştirmesinde zordur. Lazer sertleştirme, sertleştirmeden sonra yüksek boyutsal doğruluk elde edilmesi zor olan parçalara uygulanmasında etkili bir yöntemdir.



Şekil 2.12: Bir deliğin yakınındaki bir bölgeye lazerle sertleştirme uygulanması örneği (Makota, 2016).

Lazer sertleştirme işleminin avantajlarını özetleyecek olursak;

a) Bir iş parçasında minimum ısıtma

1. Sertleştirme bozulması küçük olduğu için temperleme ve son rütüş işlemlerine gerek duyulmaz.
2. Sertleştirmeden sonra bir iş parçasında oluşan ısı çok küçük olduğundan taşıma ve kontrolde ekstra bir makineye ihtiyaç duyulmaz.

b) Kendiliğinden soğutulması nedeniyle sulama ortamı gerekmez

1. İş parçası temiz tutulur.
2. Çalışma ortamı temizdir.
3. Sertleştirme işlemi sonrasında dahi temiz kalır.
4. Soğutma ortamının bakımı gereksizdir.
5. Soğutma koşulunun kontrolü gereksizdir.

c) Diğer

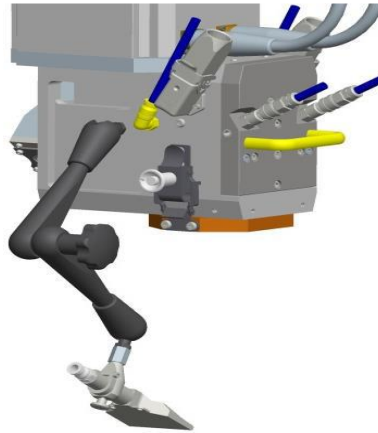
1. Ekipman bakımının yapılması kolaydır, çünkü ışınlama durumu koruma camının periyodik olarak temizlenmesiyle korunabilir. Lazer osilatöründen optik merceğe olan mesafe, serbestçe kurulabileceğinden, ekipman yerleşimi yapmak kolaydır. Deneysel üretimin önceliği kısadır, çünkü lazer ışınının spot boyutu yalnızca optik mercekle değiştirilerek değiştirilebilir ve lazer ışın konumu serbestçe belirlenebilir.

BÖLÜM 3. EKİPMAN VE İŞLEME PROSEDÜRÜ

3.1 Lazerler

Lazer uygulamalarında dört farklı türde lazerler kullanılır. Bunlar; CO₂, lamba ve diyot pompalı Nd: YAG ve yüksek güçlü diyot lazerler kullanılmaktadır. Yaklaşık 10 yıl kadar önce, sadece CO₂ lazerleri kullanılmaktadır. Flaş lambası ve diyot pompalı multikilowatt Nd: YAG lazerlerinin geliştirilmesi, birçok avantaj sağlamaktadır. Nd:YAG lazer kaynağının en önemli avantajlarından biri, lazer ışığının (1.06µm) dalga boyunun ışının nispeten küçük enerji kayıplarına sahip bir optik fiber vasıtasıyla iletilmesidir. Bu işlem lazer ışınının esnek bir şekilde verilmesini sağlıyor. Sonuç olarak, yüksek lazer gücü sağlayan Nd: YAG lazerleri, üç boyutlu işleme için robot kullanılarak işlem yapılmaktadır (Khorram, 2016).

Işın dalga boyu azaldıkça yani CO₂ lazer için örneğin 1.06µm azaldığından, metal yüzeylerin emiciliği artar ve bu nedenle emici bir kaplama gerekli değildir, böylece işlemi basitleştirir. Yakın zamanda, multikilowatt diyot lazerleri, kompakt ve kompleks geometri bileşenlerinin sertleştirilmesi için doğrudan bir robot üzerine monte edilebilen 0.8µm dalga boyuyla geliştirilmiştir.



Şekil 3.1: Erlas lazer sertleştirme başlığı (Roland, 2016).

3.1.1 Lazer ışınının yüzeylerle etkileşimi

Normal şartlara göre CO₂ lazer ışınının sadece yüzde 5'i ve Nd: YAG lazer ışınının yüzde 30'u yüzeyde emilir. Dönüşüm sertleştirmesi için kullanılan lazer enerjisini arttırmak için genellikle bazı yollar kullanılır.

CO₂ lazer ışığının emilmesi, yüzeyi 100 kum zımpara kâğıdı ile pürüzlendirerek yüzde 5'ten 12'ye yükseltilebilir. Normal ışın demeti ile işlenemeyen parçalara dik açı ile işleme tutarak emilimi arttırmak, en azından ışın demetini kutuplaştırarak artış sağlanabilir. Bu sistem, silindirik bir delik içindeki küçük alanların sertleşmesinde kullanılmıştır. Bu sistemin dezavantajı, ışının keskin bir açı ile bir yüzeye çarpması durumunda dışarı yayılmasıdır.

3.1.2 Lazer emilimini arttırmak için yüzey işlem

İş parçasındaki lazer radyasyon emilimini arttırmak için çeşitli yüzey uygulamaları yapılmıştır. CO₂ lazer radyasyonunun yaklaşık yüzde 80'i fosfatlanmış bir yüzeye emilir hem çinko fosfat hem de manganez fosfat kullanılmıştır. Lazer enerjisinin yaklaşık yüzde 88'i bir koloidal grafitle kaplanmış bir yüzeye emilir; siyah sprej boya biraz daha iyi performans göstermektedir. Yüzeye sprej uyguladığında dönüşüm sertleşmesinde derinlikte iyileşmeler olmaktadır. Pürüzsüz bir yüzey istendiği için bu uygulama bazı parçalarda istenmez.

Fosfat uygulaması, birçok işlemde tercih edilir, çünkü kolaylıkla elde edilebilir ve basit bir daldırma işlemi ile düzgün bir şekilde uygulanabilir. Bir püskürtme işlemi, özel olarak havalandırılmış bir çalışma alanı gerektirir ve bazı iş parçalarında düzgün şekilde uygulanması zordur.

Lazer yüzey işlemlerinde CO₂ lazere ihtiyaç vardır. Nd:YAG ve diyet lazer dönüşümlü sertleştirmede kullanılırken yüzey işlemlerle kullanılamaz ancak derinlik arttırıldığında kullanılır.

Yüzey işlemlerin en büyük dezavantajı ilave bir işleme gerek duymasıdır. Eğer iş parçasında maskeleye yapılmazsa yüzey işlemi yapmak çok zordur. Boya kullanılırsa oluşacak kalıntıların tekrar temizleme işlemi gerekecektir. Bu adım atlanırsa eğer lazer

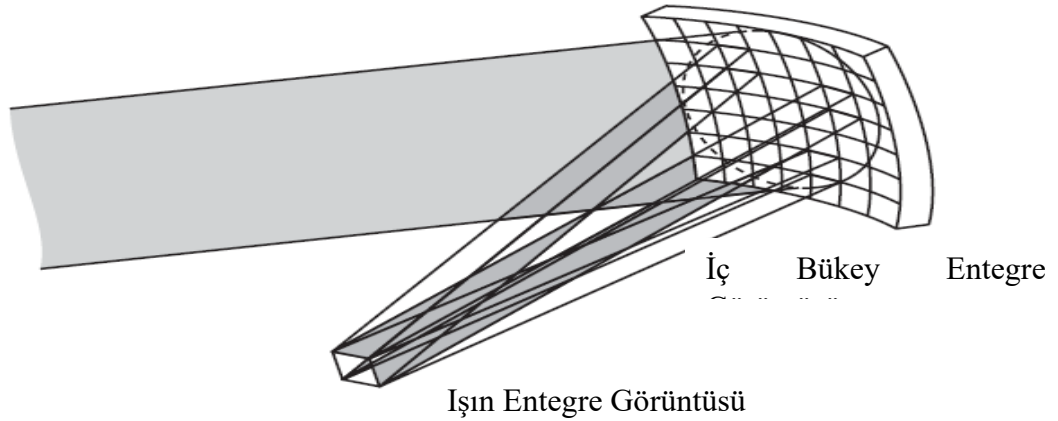
ışının etkileşimi azalmakta ve pirometreyi engellemektedir. Bu yüzden fazladan bir adım gerekmektedir.

3.1.3 Sistemler ve ışın iletim optiği

Genel olarak, bir lazer ışınının enerji profili, bir yüzeyi düzgün şekilde ısıtmak için uygun değildir. Enerji kısmen odaklanmış ışının merkezinde yoğunlaşmaktadır. Birçok yüksek güçlü lazerde dağılım ayna hizalamasına duyarlıdır ve sistem ısınırken zamanla kayabilir. Bu nedenle, çoğu lazerle ısıyla işleme tabi tutma sistemi lazer ışını değiştirilmesi için aşağıda açıklanan optikleri içermektedir, böylece lazer ışını gerektiği yerde güç sağlar.

3.1.4 Entegratörler, reflektif ve iletici

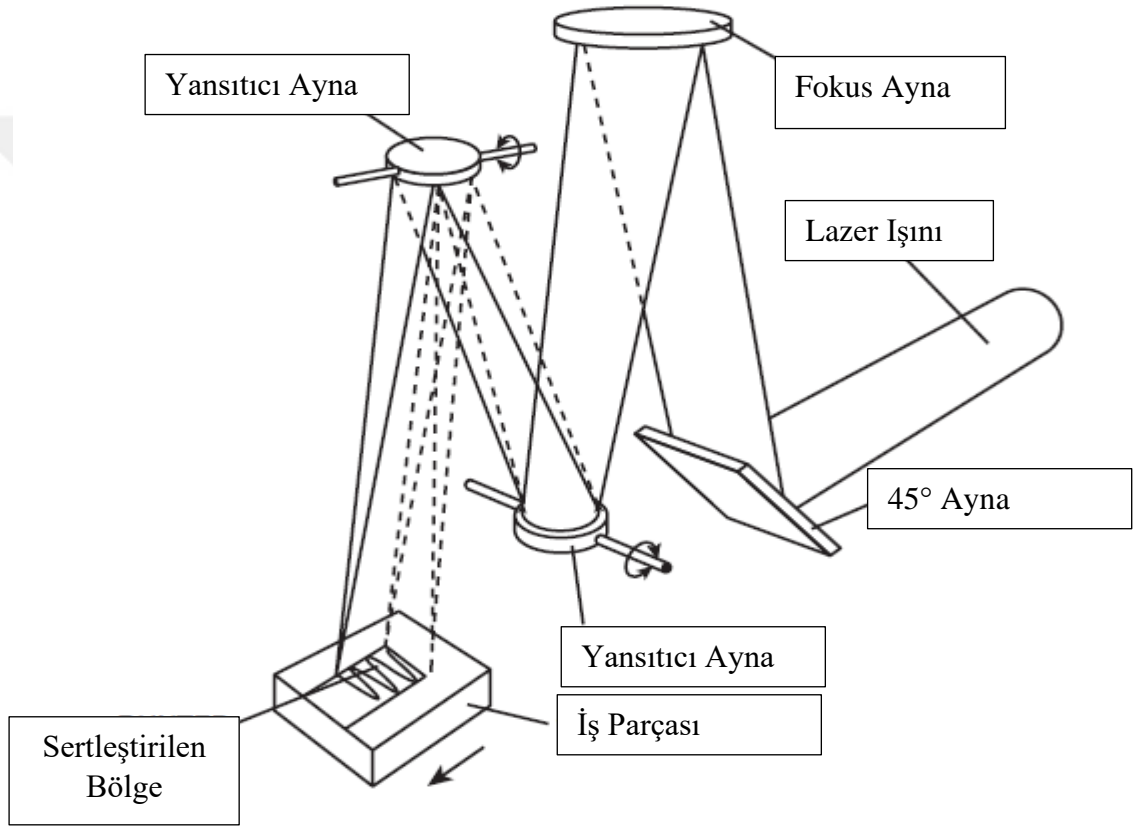
Bir lazer ışını, ışığın üst üste binmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bir ayna yüzeyi oluşturarak, üst üste yerleştirilen öğeler ışının entegre edilmesine sağlayarak bir lazer ışını bir üniform kaynağına dönüştürür. Bu, Şekil 15'te gösterilmektedir. İletici optikler aynı işlevi yerine getirecek şekilde tasarlanır. Bu, yüksek güçlü 10.6- μm ışık ileten optiklerin sınırlı dayanıklılığı nedeniyle CO₂ lazerlere kıyasla Nd: YAG lazerleri için daha uygundur.



Şekil 3.2: Işın entegratörü (Narendra, 2002).

3.1.5 Tek ve iki boyutlu tarayıcılar

Erime olmadan lazerli yüzey ısınması, çelikte önemli derinlik derinliği için 100 msn veya daha fazla bir zaman sabitine sahip olduğundan, hızla taranan bir nokta, eşit bir güç hattı ile aynı etkiye sahiptir. Şekil 3.3'te gösterilen gibi tarayıcılar, çizgi genişliğini ve tarama uzunluğunu önemli bir aralıkta değiştirebilir. İki ortogonal tarayıcı bir araya getirilirse, iş parçasının yüzeyinde isteğe bağlı olarak iki boyutta güç modları üretmek mümkündür.

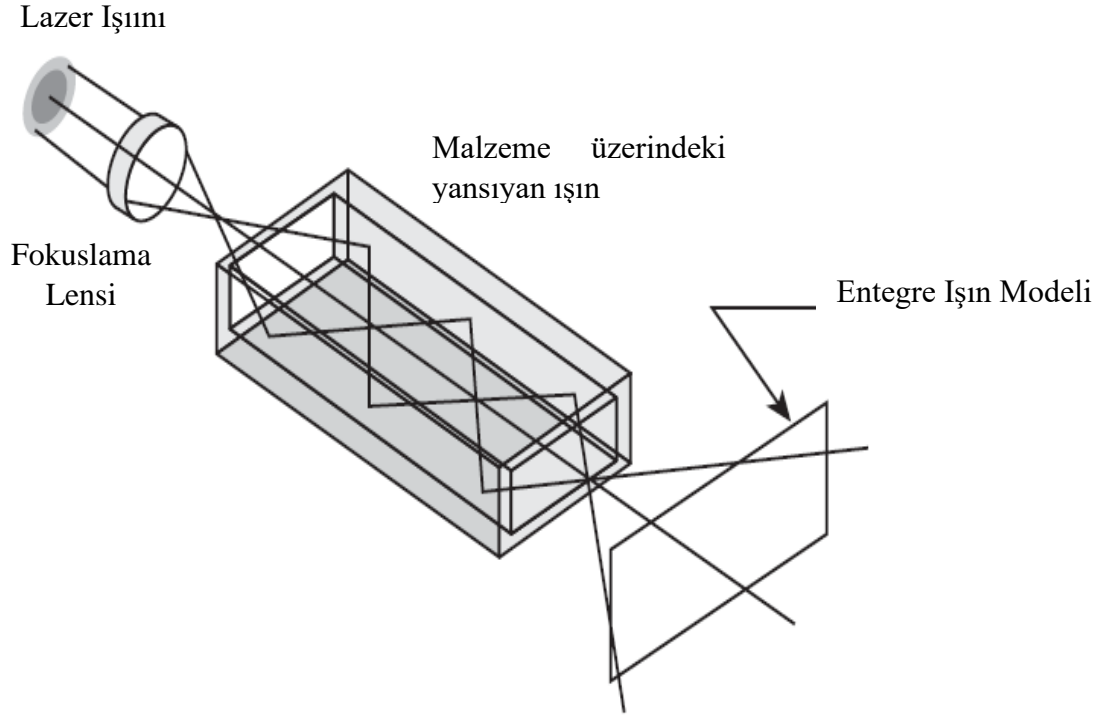


Şekil 3.3: Işın tarayıcı (Narendra, 2016).

3.1.6 Kaleidoscope

Tarayıcıdan daha basit bir cihaz olan Şekil 3.4'te gösterilen kaleidoscope, sadece yansıtıcı duvarlara sahip bir tüptür. Borunun şekli kare, dikdörtgen veya daha farklı olabilir. Çok genişleyen ışın (genellikle kaleidoscope bir merceğin odak noktasının ötesine ayarlayarak elde edilir) boruya gönderilirse, ışık, duvarlardan birkaç kez sıçrar ve nispeten düzgün yoğunluk dağılımı ile ortaya çıkar. Çıktı, yalnızca başka bir mercek ile tekrar görüntülenecek olursa tüpün açılmasına çok yararlıdır. Kaleidoscopes, geliştirme

çalışmaları için faydalıdır, çünkü kolayca yapılır ve nispeten ucuzdur. Çoklu yansıma ve soğurma olayları nedeniyle, içlerinde altın kaplamalı olmadıkça, gelen güçlerin %30-%50'sini kaybederek oldukça verimsizdirler.



Şekil 3.4: Kaleidoscope (Narendra, 2002).

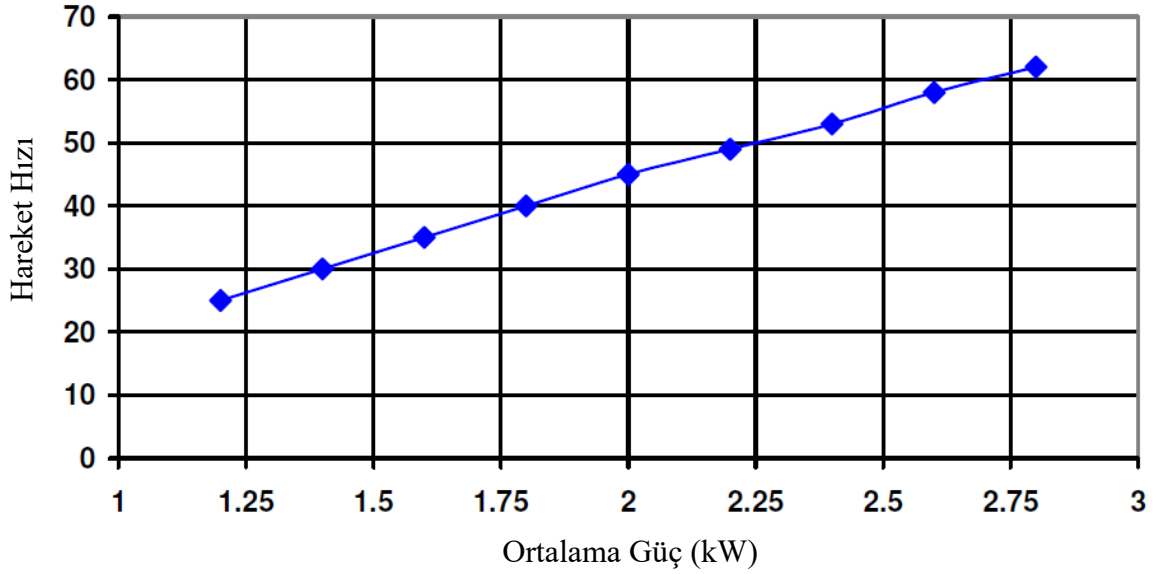
3.2 Proses Parametreleri

3.2.1 Tarama hızı

Proses tarama hızları lazer sertleştirme işlemini etkileyen büyük etkidir. Farklı spot genişlikleri kullanıldığında lazer ışınının yeterli yoğunluğu toplayabilmesine adına tarama hızında değişiklikler yapılarak yeterli verim sağlanmaktadır. Lazer prosesleri otomasyon ortamında gerçekleştirildiği için kontrol edilebilirliği açısından en verimli hızlar yakalanabilmektedir. Tarama hızı arttırıldığında sertlik derinliği azalır fakat soğuma hızı artar. Hız düşürüldüğünde soğuma hızı yavaşlar ve derinlik artar. Buna bağlı olarak da sertlik değerleri değişecektir. Bu uygulamalar işlem yapılacak malzemenin içeriğine bağlı olmaktadır.

3.2.3 Besleme oranı

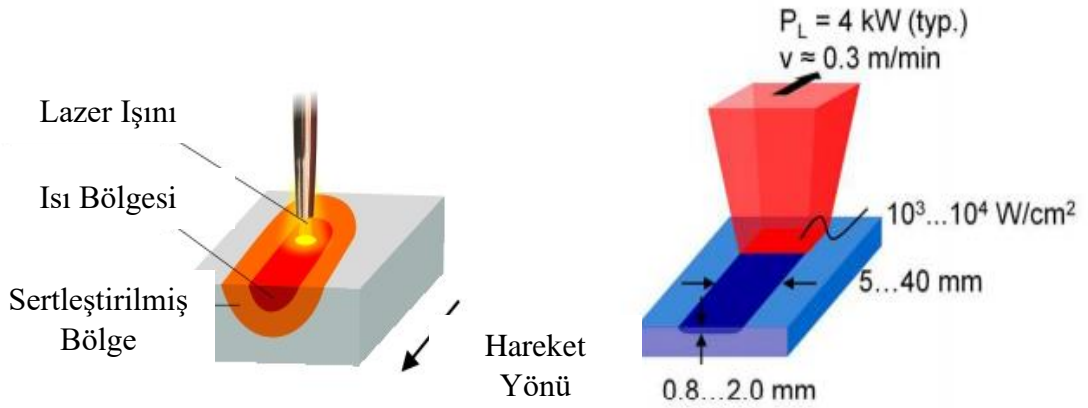
Işının ilerleme yönündeki uzunluğu, güç yoğunluğu ve iz genişliği gereksinimleri ile sabitlenir. Normal olarak 1-5 kW aralığındaki bir güç seviyesi kullanılır. Yüksek güç, buna karşılık yüksek kapsam oranları ile yüksek besleme hızını sağlar (Şekil 3.5). Besleme hızı, gerekli sertleştirilmiş derinliği ve homojenizasyon derecesini elde etmek için işlemi ayarlarken değiştirilen değişkendir.



Şekil 3.5: Yüksek güçlü Nd:YAG lazer sertleştirme (1045 Çeliği, 0.5 mm derinlikte) (Mohammed, 2014).

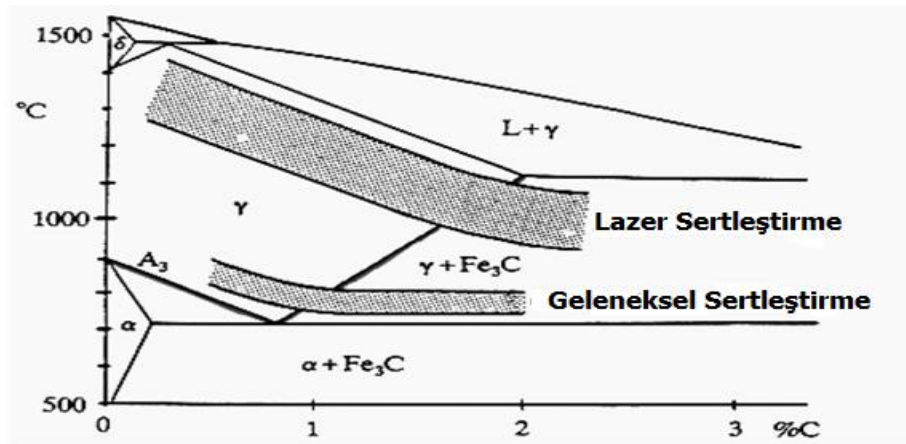
3.3 Süreç prensibi

Lazer sertleştirme işlemi 1-5 KW güç aralığında çalışılmaktadır. Birim yüzeye uygulanan güç 10^3 - 10^4 W/cm² arasındadır. Sertleştirme genişliği 5-60 mm arasında optik yardımcıları aracılığıyla değiştirilebilmektedir. Sertleştirme derinliği uygulama hızına ve sürecine bağlı olarak 2 mm seviyesine kadar gerçekleştirilebilmektedir (Makoto, 2016). Lazer ışını ve koruyucu gaz içeren proses ilkesi Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6: Proses ilkesi Lazer dönüşümü sertleştirme (Muvunzi, 2018).

Karbonlu çeliklerde %0,2 C üzerine uygulanır. Lazer dönüşümü sertleştirme tekniği, geleneksel dönüşüm sertleşmesinin tersi olarak görülebilir. Konvansiyonel sertleştirmede ürün alevle veya bir fırında A_c sıcaklığının üstünde bir sıcaklığa ısıtılır; burada yapı, ilk ferritik / perlitik yapıdan ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) bir östenitik γ fazına dönüştürülür; buradaki karbon, çelikte çözünür (Şekil 3.7). Bu proses, sıcaklık ve kompozisyona bağlı olarak bir süre gerektiren, geri dönüşümlü kısa süreli bir denge dönüşümüdür. Sertleştirme, malzeme daha sonra, ters dönüşüm ve karbon salınımı için yeterli zaman olmadığı kadar yüksek bir soğutma hızında soğutulduğunda gerçekleşir. Ferritik yapı yerine çok sert martensit oluşur. M_s sıcaklığının yaklaşık 250°C altındaki ostenit neredeyse anında martenzite dönüşür. Karbon artık atılmamakta ancak kristal yapıda kalmaktadır. Bu dönüşümle birlikte, yıpranma ve yorulma direnci gibi mekanik özellikleri iyileştirmek için yüzeyde gerilmeleri ortaya çıkaran bir hacim genişlemesi oluşur.



Şekil 3.7: Fe-C faz diyagramı (Vollertsen, 2005).

Normal sertleşme, ısıtılan ürün aniden su veya yağ ile soğutulduğunda gerçekleşir. Dış katman ilk önce soğur ve daha derin katlarda soğutma oranının daha düşük olduğu yerde orijinal yapının tersine çevrilmesini sağlar. Sonuç, ürünün soğuma hızı ve geometrisine kesinlikle bağlıdır.

Lazerle sertleştirme durumunda, ürünün hacmi serin kalır. Sadece bir yüzey tabakası lazerle ısıtılır. Soğutma, taban malzemesini söndürerek gerçekleşir (kendiliğinden soğutma). Isı transferi çelik içindeki iletkenlik nedeniyle gerçekleştiği için bu soğutma hızı, buhar üretiminin soğutma oranını kısıtladığı suyunkinden çok daha yüksektir. Sonuç olarak:

- Geleneksel sertleştirme için yüzey sıcaklığı bozulmayı azaltmak ve yığın içerisindeki ısı içeriğini kısıtlamak için düşüktür.

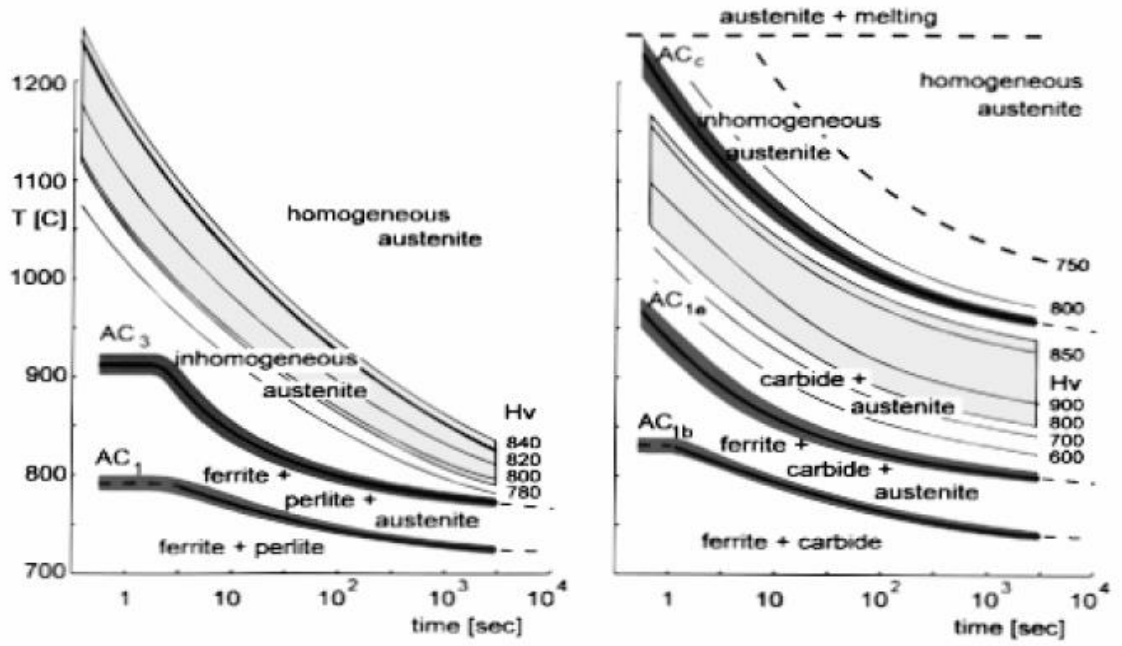
- Öte yandan lazerle sertleştirme için, yüzey sıcaklığı mümkün olduğunca yüksek olmalı, çünkü;

a) Bu östenit dönüşümünü tamamlamak için gereken süreyi kısaltır.

b) Yeterli kalın bir yüzey tabakasını kısa bir süre ısıtıldığında yüksek bir sıcaklık gradyanına ihtiyaç duyulur. Ayrıca, dökme malzemenin ısınmasını önlemek için kısa süreli ve yüksek sıcaklık gradyanlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Ac₃ hattı, denge koşulları için 0 C'de 723 ila 910 ° C arasında değişir. Bununla birlikte, 1000 ° C / s üzerindeki ısıtma hızlarında α-γ dönüşümü sıcaklığı karbon çeliği için 900 ° C'nin üzerine çıkmaktadır. Dönüşüm sıcaklıklarının mikro yapıdan ve alaşım elementlerinin varlığı ve dağılımından etkilendiğinde diğer bir unsurdur.

Dönüşüm sertleşmesi, hipo ötektik çeliklerde (%0,4-0,8 C) hem de hiper ötektik çelik (>%0,8 C) ve dökme demir üzerine uygulanır. Şekil 3.8'de iki örnek verilmektedir.



Şekil 3.8: Zaman-Sıcaklık-Östenit (TTA) sertlik diyagramı, soldaki C45, sağdaki 10Cr6 (Orlich, 1975).

Hipoötektik C45 çeliğinde, A_{c3} hattının hala homojen olmayan östenitin üstünde bulunur. Bu malzemenin homojen hale getirilmesi için zaman ve / veya daha yüksek bir sıcaklık gerekir, bu da bu malzeme maksimum sertlikte sonuçlanır.

Tipik saniyede bir işleme süresi ile 1200 °C'nin üzerinde optimal yüzey sıcaklığı bulunur. Böylece, yüzeyin altındaki sıcaklığın her zaman daha düşük olduğu düşünülmelidir. Bu nedenle maksimum sertlik ve sertleşme derinliği için yüzey sıcaklığı mümkün olduğunca yüksek olmalıdır. Üst limit burada yüzey eritilmesinden kaçınılması gereği ile verilir.

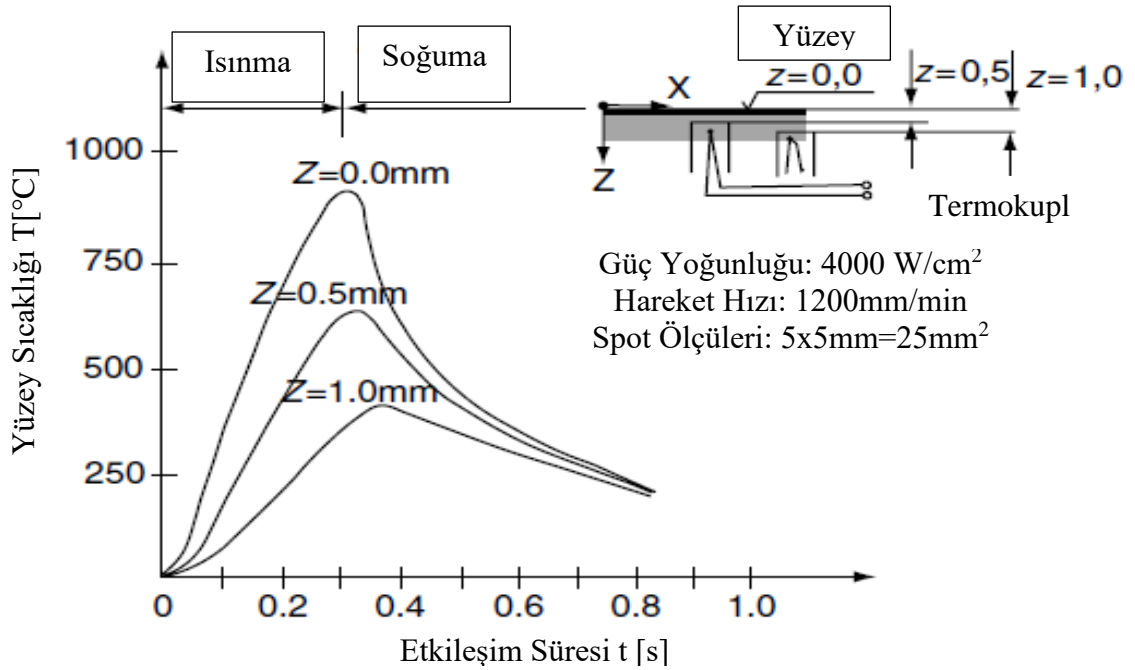
Şekil 3.8'de sağ hiper-ötektik 10Cr6 çeliği için resim oldukça farklıdır. Birinci fark, homojen östenitin kısa işlem süresi boyunca elde edilememesidir. Fakat aynı zamanda homojen östenitin maksimum sertlik için maksimum sıcaklığın gerekli olmadığını da göstermektedir. Bunun yerine, HV 900'ün maksimum sertliği östenit +karbürler alanında daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşir.

3.3.1 Lazer ısıtma ve sıcaklık döngüsü

Bir malzemenin verimli bir şekilde ısıl işleminden geçirilmesi için bir ön şart, malzemenin faz dönüşümüne ve sertleşmeye uygun olmasıdır. İş parçası yüzeyine yoğun giren enerji yüzeyi sertleştirir. Yüzey sertleştirilmiş tabaka derinliği, lazer ışınının güç yoğunluğuna

ve ışınlanmış materyalin kendi dalga boyu tarafından tanımlanan yayılan ışığı emme kapasitesine bağlıdır. Lazer ısıl işlem hızlı soğutma ile lokal olarak karakterize edilir. Ancak çökme sertleşmesi, normalizasyon gibi diğer ısıl işlem türlerinde bu mümkün değildir.

Kawasumi, lazer yüzey sertleştirme çalışmalarında CO₂ lazer kullandı ve bir malzemenin ısıl iletkenliğini araştırdı. Homojen ve izotropik bir gövde olarak alınan üç boyutlu cisimdeki sıcaklık dağılımını hesaplarını yaptı. Elde edilen ısı iletkenlik denklemleri temel olarak, sıcaklık çevrimlerinin sayısız simülasyonunu gerçekleştirdi ve iş parçası yüzeyinde elde edilen maksimum sıcaklıkları tespit etti.



Şekil 3.9: İş parçası yüzeyindeki sıcaklığın dönüşümü ve iç kısmı ile etkileşim zamanı (Revised, 2013).

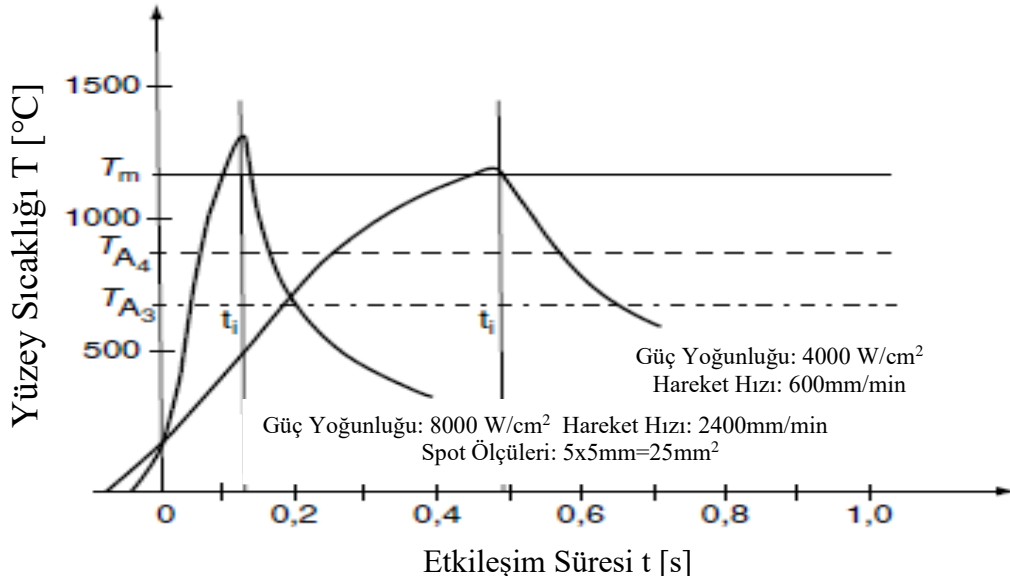
Şekil 3.9, lazer ısıtma ve kendi kendini soğutmada sıcaklık döngüleri gösterilmektedir. Sıcaklık döngüsünü oluşturmak için, yüzeyde ve içeride iş parçasının içine monte edilen termokupullarla kaydedildi. Bu durumda, optik eksenini olan lazer ışını, belirli derinliklere yerleştirilen termokupullerin merkezleri boyunca doğrudan dolaşıyordu. Isıl çevrim, ısıtma ve soğutma döngülerine ayrıldı. Tek tek derinliklerde sıcaklık döngüleri şu sonuçları verdi.

1. Yüzeyde ve derinliklerde maksimum sıcaklık elde edilmiştir.

2. Elde edilen maksimum sıcaklığın derinliği azdır.
3. Isıtma süresi, elde edilen maksimum sıcaklık veya hemen sonrasında elde edilir.
4. Maksimum sıcaklığın elde edilme derinliği ne kadar yüksek olursa ısıtma süresi de o kadar uzun olur.
5. Derinliklerde sıcaklık farkları, ısıtma soğumadan daha yüksektir.

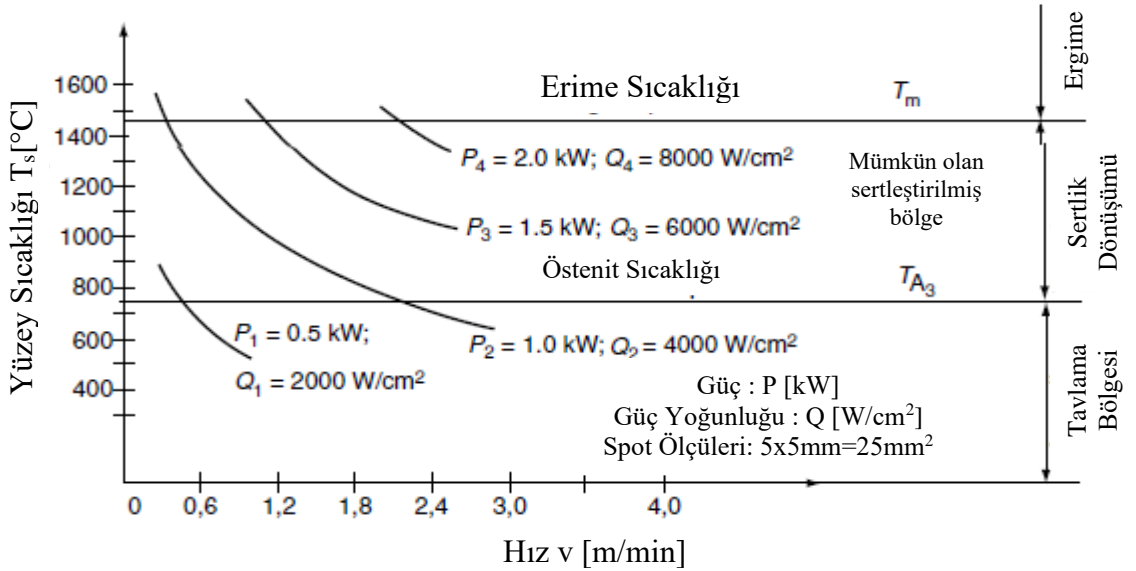
Sonuç olarak, derinliklerde, soğutma süreleri, örneğin maksimum bir sıcaklık elde etmek için ısıtma sürelerinden oldukça uzundur.

Şekil 3.10, lazerli yüzey ısıtmasında iki sıcaklık döngüsünü göstermektedir. Her durumda, yüzeyde elde edilen maksimum sıcaklık malzemenin erime noktasından daha yüksektir; bu nedenle yeniden eritme meydana gelmektedir. Yeniden eritme işlemi, malzemenin ısıtılması ve eritilmesi, hızlı soğutma ve malzeme katılaşmasını içerir. Yüzeydeki maksimum sıcaklık erime noktasından daha yüksektir, lazer ışını çevreleyen materyalde erimiş bir havuz oluşacaktır. İş parçasında lazer ışınının sabit bir dolaşımı nedeniyle, erimiş havuz çalışma parçasında da ilerlemektedir, bunun arkasında metal hızla katılaşır. Yeniden eriyen malzemenin derinliği, malzemenin erime noktasının ve katılaşma sıcaklığının bulunduğu derinlik ile tanımlanır.



Şekil 3.10: Lazer ışığı etkileşim süresinin ısıtma sırasındaki sıcaklık döngüsü üzerindeki etkisi ve farklı güç yoğunluklarında ve hareket hızlarındaki soğutma etkisi (Revised, 2013).

Yeniden eritilen katmanın derinliğini optik mikroskopta veya çapraz kesitte derinliğini ölçerek deneysel olarak belirlenebilir. Şekil 3.11, parça yüzeyindeki maksimum sıcaklığı, güç yoğunluklarını ve farklı hızları vermektedir. Çizilen dört eğri dört farklı güç yoğunluğunu Q_i , yani 2, 4, 6 ve 8 kW/cm² olarak gösterir. En düşük Q_1 güç yoğunluğuyla, dönüşüm hızı 0,3 ila 0,5 m/dk arasında değişirse dönüşüm sertleştirilmesi yapılabilir. Q_4 'ün en yüksek güç yoğunluğuyla, iş parçasının v hızı 2,0 m/dk geçmediği sürece etkili bir sertleştirme yapılır. En yüksek ve en düşük arasındaki güç yoğunlukları Q_2 ve Q_3 ile, etkili sertleştirme yapabilmek için geniş hız aralıkları seçilmelidir, yani 0,4 ila 2,0 m/dk arasında yapılırsa sertleştirilmiş bir mikro yapı elde edilir. İş parçası ve/veya lazer ışınının geniş yelpazedeki hareket hızı, farklı kalınlıklarda yüzey katlarının sertleşmesini sağlar.



Şekil 3.11: Güç yoğunluğunun ve hareket hızının sertleşmeye etkisi (Vollertsen, 2005).

3.3.2 Proses geliştirme

Bir süreç geliştirirken çoğu işlem değişkenini belirleyen bazı gereksinimleri yerine getirmelidir.

İlk olarak sertleştirme derinliği öngörülür. Örneğin 1 mm derinlikte, malzeme ve gereken sertliğe bağlı olarak, istenen yüzey sıcaklığı Şekil 3.11'de verilen verilerle bulunur. Örneğin 1200 °C'lik bir yüzey sıcaklığı malzeme verilerinden dönüşüm sıcaklığı verilir.

Örnek olarak $T_{Ac3} = 900 \text{ } ^\circ \text{C}$ varsayarsak bu örnek için malzeme içine ısı akışı tek boyutlu olarak düşünülebilir. Ardından derinliğin z üzerindeki sıcaklık aşağıdaki gibi olur:

$$T_{z,t} = \frac{AI}{\gamma} \sqrt{4at} \operatorname{ierfc} \sqrt{\frac{z^2}{4at}} \quad (1.0)$$

$Z = 0$ olan yüzeyde

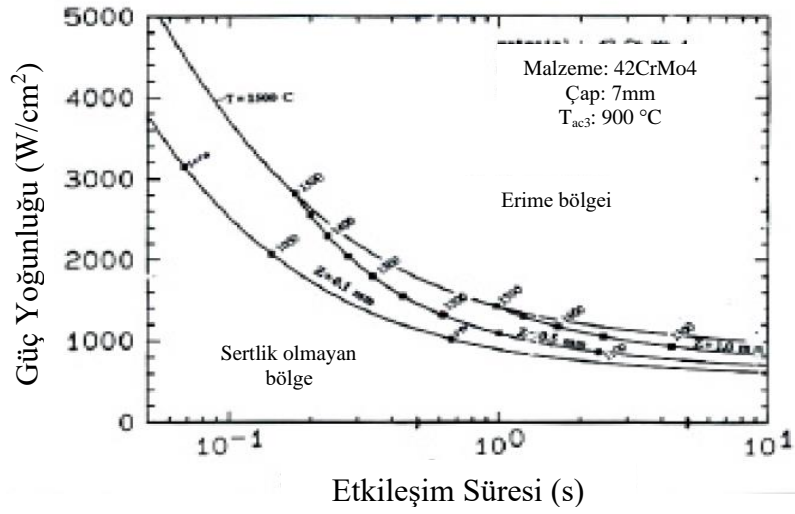
$$T_s = \frac{AI}{\gamma} \sqrt{\frac{4at}{\pi}} \quad (1.1)$$

Sertleşme derinliği z_h 'de ki sıcaklık T_{Ac3} elde edilir.

$$\frac{T_{Ac3}}{T_s} = \sqrt{\pi} \operatorname{ierfc} \sqrt{\frac{z_h^2}{4at}} \quad (1.2)$$

Denklem 1.2'deki tek bilinmeyen miktar lazer etkileşim zamanıdır ve verilen örnekte $t = 1 \text{ s}$ 'dir. T ve Denklem 1.2 ile emilen bir güç yoğunluğu 1180 W / cm^2 gereklidir. Gerçek lazer gücü, deneysel olarak ölçülmesi gereken absorptiviteye bağlıdır. Genelde metal yüzeyler lazer radyasyonunun çoğunu yansıtmaktadır. Emicilik CO2 lazerler için %10'dan az, Nd: YAG lazerler için %40'a kadar değişir. Her iki durumda, emme oranını %80'in üstünde arttırmak için bir (grafit) kaplama uygulanır ve bu da işlem verimliliğini önemli ölçüde artırır.

Bir sonraki adım tarama genişliği ve tarama hızıdır. Genel olarak tek boyutlu ısıl işlemden, sıcaklık derinliği tarama genişliğinden azdır. Böylece etkileşim süresi tarama hızına ve tarama genişliğe bağlıdır. Şekil 25'te, örnek olarak, kalıp çeliğinde çapı 7 mm olan bir lazer spot için bir sertleştirme diyagramı gösterilmektedir. Yukarıda verilen denklemler yerine, daha karışık dairesel grafikler kullanılmıştır. Bu grafiklerde üst sınır erime noktası olarak gösterilmiştir. Ayrıca sabit sertlik derinliği (0.1, 0.5 ve 1.0 mm) 3 satır gösterilmektedir.

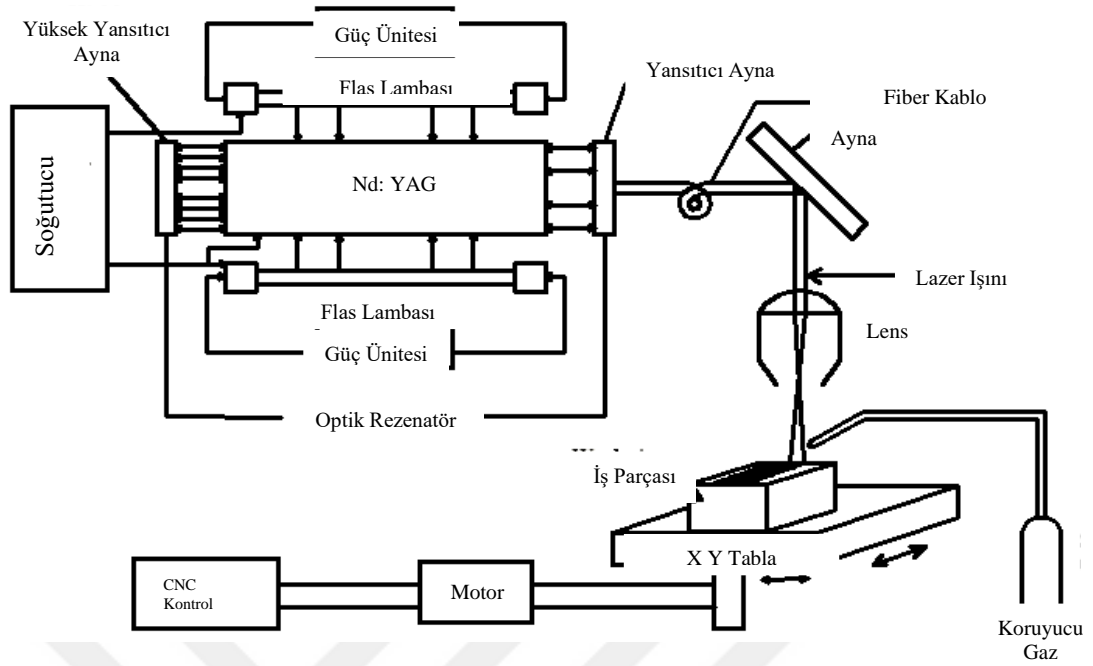


Şekil 3.12: 42CrMo4 çeliğin sertleştirme diyagramı (Vollertsen, 2005).

En ciddi sorun, güç yoğunluğundaki (dikey) menzilin küçük olmasıdır. Ayrıca, net güç yoğunluğu lekelenme ve emicilik değişiklikleri nedeniyle en belirsiz parametredir. Hesaplanan yüzey sıcaklığı çizgiler boyunca verilmiştir. Gerçek yüzey sıcaklığını ölçerek lazer gücü, yüzey sıcaklığı ve ilgili sertleşme derinliği gereken seviyede tutulacak şekilde kontrol edilebilir.

Prosedür, önce gereken sertlik derinliğini seçmek, daha sonra en iyi yüzey sıcaklığını seçmektir. Ardından Şekil 3.12'deki diyagram ilgili etkileşim süresini gösterecektir.

Süreçteki bu bilgiler, doğru sertleşmeyi sağlamak ve yüzey eritmeyi önlemek için sıcaklık kontrol sistemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu, şimdi lazer sertleştirme için optik tarama yöntemiyle uygulanmaktadır. Şematiklerin bir örneği Şekil 3.13'te gösterilmektedir. Burada, bir robot ya da diğer bir manipülatör tarafından kurulum yüzey üzerinde hareket ettirilirken, bir tarama aynası noktayı yüksek hızla dikey olarak pist üzerinde hareket ettirir. Nokta sıcaklığı, aynı optik yol boyunca bir pirometre ile aynı anda ölçülür ve tarama sırasında gerçek zamanlı sıcaklık kontrolü için sensör sinyali olarak kullanılır. Taranan bölgenin genişliği CNC kontrolü ile değiştirilebilir. Tarama, ısı transferine kıyasla hızlı olduğundan, ısı kaynağı yüzey boyunca hareket eden dikdörtgen bir kaynak olarak düşünülebilir. Bu şekilde tek bir nokta ile sertleştirmeye kıyasla daha geniş izler elde edilir.



Şekil 3.13: Nd: YAG lazer sertleştirme sisteminin şeması (Dinesh, 2011).

Bu örnekte esnek bir hareket özgürlüğü sunan bir fiber optikli bir Nd: YAG lazeri kullanılmıştır. Benzer gelişmeler, doğrudan robot üzerine monte edilen yüksek güçlü bir diyot lazer uygulayan Hannweber ve Seifert tarafından açıklanmaktadır.

Martenzite ve beynite dönüşümü, malzeme içindeki gerinim enerjisinin hızlı bir şekilde serbest bırakılmasıyla üretilen akustik emisyonu ölçerek gerçek zamanlı olarak izlenebilir. Bu teknik faz dönüşümünü incelemek için yeterlidir, ancak endüstride kullanılmaz. Akustik sinyal soğutma faz tekniği proses kontrolünde uygulama olanağı yoktur.

3.4 Modelleme

İşlem parametrelerindeki termik döngülerini, sertleşme sonucunu ve gerilme üzerindeki etkisini incelemek için yapılır. Denklem 1.0'da görülen bir boyutlu ısı iletim yarı sonsuz katıdır. Bu formülde üst eğrinin veya Gauss dağılımında bulunan dairenin içinde görülmektedir. Buna göre ilk başta bir boyuttan yola çıkarak hesaplama yapılır.

Sonra lazer ışının malzeme üzerindeki hareketi dahil edilir. Isı iletim denkleminde ekstra bir terim ortaya çıkarılır. Çıkarılan terim dinamik transfer fonksiyonu $H_s = T_{x,y,z,s}/P_{l,s}$ indüklenen frekans aralığını ifade eder. Lazer gücünün 100 Hz'lik bant genişliğindeki

sıcaklık kadar ölçülebilir. Fakat yüksek frekansta verim düşük olduğundan faz kayması kabul edilemez. Faz kayması belli bir oranda artarak devam eder ve sonsuz işlem olarak kabul edilir. Işın hızı arttıkça faz kayması da artar.

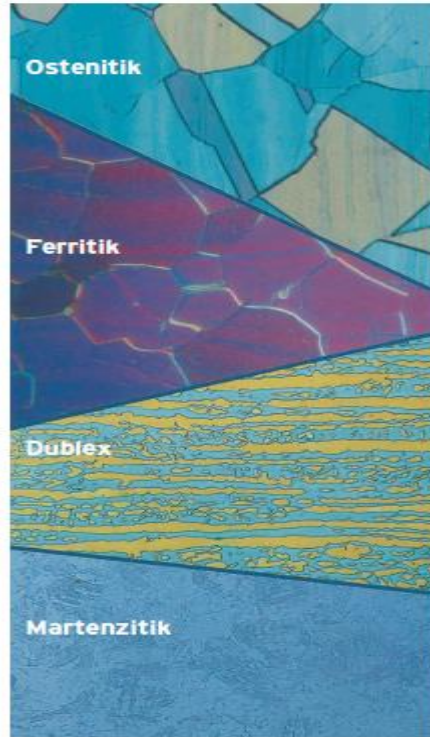
Modelleme basit geometrilerle yapılır. Fakat karmaşık parçalar için uygulanamaz. Karmaşık parçalar için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılmaktadır ve gün geçtikçe kullanımı artmaktadır. Çoğu ticari FEM paketlerinde, ara birim işlemleri hazır paket halinde kullanıcıya sunulmaktadır. Buda işlemi kısaltmıştır. Sıcaklık dağılımı ve sıcaklık zaman sonuçları genellikle yüzeyin altındaki derinlikte belirlenir. Elde edilen sonuçlar TTA ve TTT diyagramlarına göre yorumlanır. Ancak onlar 1000 K/s ila 10 000 K/s'de yüksek sıcaklık ve soğutma oranlarda daha az uygunluk sağlar. Seksenli yıllarda faz dönüşümleri etkisi ve stresin faz kinetiği üzerindeki etkisi araştırılmıştır ve parça üzerinde faz dağılımı yapılmıştır. Geijselaars faz dönüşümünün kinetik modelini ve buna bağlı olayları, hızlı termal dönüşümleriyle birlikte tam oluşmayan östeniti ve yüksek sıcaklıklarda tane büyüklüğüyle birlikte dönüşümde şekil değişikliği hakkında sertleştirme işlemleri yaptı. Yaptığı çalışmalarda, kristaller içindeki değişimlerden ziyade, mikroskobik olguları tanımlamaktır. Her fazın ayrı bir durum değişkeni olarak ele alındı. Bu faz durumların değişimi kinetik denklemlere ayrıldı, böylece farklı termal döngüler farklı faz durumu dağılımlarına neden oldu. Bu durum sonucunda faz dağılımların sertliği, gerilmeleri ve bozulmaları hesaplanabilir. Fakat bu yöntem endüstriyel uygulamalar için yeterli değildir. Temel nedeni farklı malzemelerde olan davranışların bilinmemesidir. Bunun için geniş kapsamlı bir çalışma yapılması gerekmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile lazer sertleşmenin analizi yapılması yaklaşık son 5 yıldır yapılmaktadır. Hosenfeldt düz numunelerde bir veya iki sertleştirilmiş izler için hesaplamıştır. Çatlak oluşumunu ve yorulma dayanımını Baiert ve Schnack geliştirdi.

BÖLÜM 4. PASLANMAZ ÇELİKLER

4.1 Paslanmaz Çelik Nedir?

Normal alaşımsız ve az alaşımlı çelikler korozif etkilere karşı dayanıklı olmadıklarından, bu tür uygulamalar için genellikle paslanmaz çeliklerin kullanılması gerekir. Paslanmaz çelikler mükemmel korozyon dayanımları yanında, değişik mekanik özelliklere sahip türlerinin bulunması, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesi, şekil verme kolaylığı, estetik görünümü gibi özelliklere sahiptirler. İçerisinde en az % 10,5 oranında (kütlece) krom (Cr) ve en çok % 1,2 oranında karbon (C) içeren demir esaslı alaşımlar olarak tanımlanırlar. Bu çelikler, korozif ortamlarda çalışacak makine ve yapı elemanlarının en önemli malzemesi olmakla birlikte; üstün mekanik özellikleri sayesinde, uçak, kimya, petro-kimya, gıda, ilaç endüstrisinde, nükleer enerji santrallerinde, takım ve paslanmaz eşya endüstrisinde geniş kullanım alanına sahiptirler.



Şekil 4.1: Paslanmaz çeliklerin mikro yapıları (Aran, 2004).

4.1.1 Paslanmaz çeliklerin üstünlükleri

1. Korozyon Dayanımı

Paslanmaz çeliklerin tüm türleri korozyon direnci yüksektir. Atmosferik korozyona, asit ve alkali çözeltilere dahi dayanımı yüksektir. Ayrıca paslanmaz çelikler yüksek sıcaklık ve basınçlarda kullanılabilir.

2. Yüksek ve Düşük Sıcaklıklar

Paslanmaz çeliklerin bazı türlerinde yüksek sıcaklıklarda dahi tufallanma ve malzemenin mekanik dayanımında önemli bir düşme görülmez. Bazı türleri ise çok düşük sıcaklıklarda gevrekleşme meydana gelmez ve tokluklarını korurlar

3. İmalat Kolaylığı

Paslanmaz çeliklerin hemen hepsi kesme, kaynak, sıcak ve soğuk şekillendirme ve talaşlı imalat işlemleri ile kolaylıkla biçimlendirebilirler.

4. Mekanik Dayanım

Paslanmaz çeliklerin büyük çoğunluğu soğuk şekillendirme ile pekleşir ve dayanımının artması sayesinde tasarımlarda malzeme kalınlıkları azaltılarak parça ağırlığında düşüş sağlanır. Bazı türlerde ısıtılarak işlem yapılarak yüksek dayanım sağlanır.

5. Hijyenik Özellik

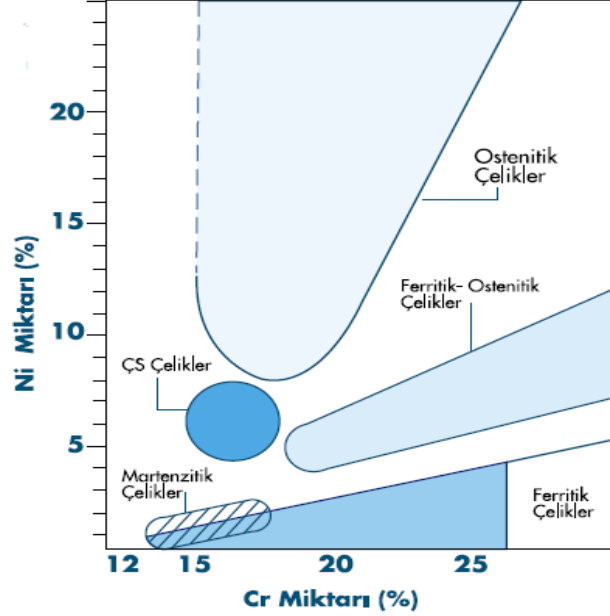
Paslanmaz çelikler kolay temizlenebilir olması, bu malzemelerin hastane, mutfak, gıda ve ilaç sanayinde yaygın olarak kullanılması sağlar.

4.2 Paslanmaz çeliklerin türleri

Paslanmaz çeliklerde krom elementi yanı sıra nikel, manganez, molibden, bakır, azot gibi alaşım elementleri de kullanılmaktadır. Alaşım elementi ilavesi ile paslanmaz çeliklerin fiziksel yapısı, mekanik özellikleri ve korozyon dayanımı değişmektedir. Paslanmaz çelikler kimyasal bileşimlerinde bulunan alaşım elementlerinin etkilerine bağlı olarak beş gruba ayrılmaktadır.

- Östenitik Paslanmaz Çelikler
- Ferritik Paslanmaz Çelikler

- Martenzitik Paslanmaz Çelikler
- Ferritik-Östenitik (Dubleks) Paslanmaz Çelikler
- Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler



Şekil 4.2: Cr ve Ni elementlerinin paslanmaz çeliklerin üzerinde etkisi (Aran, 2004).

4.2.1 Östenitik paslanmaz çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler bileşiminde %12-25 Cr ve %8-25 Ni içeren ve paslanmaz çelik ailesinin en yaygın kullanım alanına sahip üçlü Fe-Cr-Ni alaşımlarıdır. Bu alaşımların yapıları bütün ısıl işlemlerde östenitik (YMK) yapıda kaldığı için östenitik olarak adlandırılır. Ni kuvvetli bir östenit yapıcı olduğundan, bu çeliklerde katılaşma sırasında ortaya çıkan östenit oda sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda bile dönüşmeden kalır. Soğuma esnasında östenit-ferrit dönüşümü olmadığından bu tür paslanmaz çelikler su verme yolu ile sertleştirilemezler. Bu çelikler antimanyetikdir. Östenitik paslanmaz çelikler özellikle oksitleyici veya redükleyici ortamlarda iyi korozyon direncine sahiptir. Östenitik paslanmaz çelikler karbonlu çeliklerden daha yüksek termal genleşme katsayısına ve daha düşük termal iletkenlik katsayısına, daha yüksek elektrik direncine ve daha düşük ergime noktasına sahiptirler. Östenitik paslanmaz çelikler bugün kullanımda paslanmaz çeliklerin yaklaşık %80-90'ını oluşturur. Bu çelikler Fe-Cr

sisteminde östenit faz alanını genişletici Ni ve Mn gibi elementlerin katılmasıyla geliştirilmiştir. En yaygın türü 304 ve 316 tipleri gibi 300 serisi alaşımlardır.

4.2.2 Ferritik paslanmaz çelikler

Dünyada en çok kullanılan ikinci paslanmaz çelik grubudur. Atomik yapısı hacim merkezli kübiktir. Bileşiminde %10-30 arası krom alaşım elementi bulundurmaktadır. Ferritik paslanmaz çeliklerin başlıca alaşım elementi krom alaşım metalidir. Korozyon dayanımını arttırmak için molibden, kaynak kabiliyetini artırmak içinde titanyum, niyobyum ve alüminyum gibi alaşım elementleri kullanılmaktadır. Ferritik paslanmaz çelikler AISI 400 serisi olarak adlandırılmaktadır. En çok tercih edilen ferritik paslanmaz çelik kalitesi %16-18 krom içeren AISI 430 kalitedir.

4.2.3 Martenzitik paslanmaz çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler düşük karbonlu veya yüksek karbonlu olarak üretilmektedir. Düşük karbonlu martenzitik çelikler, östenit bölgesinden havada soğuma ile elde edilmektedir. Oluşan martenzit yapının sertlik ve mukavemet değerleri yüksektir, temperleme ısıl işlemi ile tokluk ve süneklik özellikleri artırılmaktadır. Yüksek karbonlu martenzit çeliklerde karbon miktarı %1,2'ye kadar yükselmektedir. Martenzitik çelikler sert manyetik malzemelerdir. Korozyon dayanımları krom miktarına bağlı değişkenlik göstermektedir. Seyreltik nitrik asitlerde, nötr tuzlarda, temiz atmosfer şartlarında korozyon dayanımı göstermektedir. 600°C ve üzeri meneviş işlemlerinde krom karbür çökmesi gerçekleşir ve korozyon dayanımı azalmaktadır.

4.2.4 Ferritik-Östenitik (Dubleks) paslanmaz çelikler

Yüksek oranda krom %18-28 ve orta miktarda nikel %4,5-8 içeren çeliklerdir. Nikel miktarı en çok 58 olup, bütün içyapının östenitik olması için yetersizdir. Ferrit ve östenit fazlarından oluşan içyapı nedeniyle çelikler dubleks olarak adlandırılır. Dubleks çeliklerin çoğunluğu %2,5-4 molibden içerir. Bunlar hem iyi mukavemet hem de iyi süneklik özelliklerini birlikte sağlarlar. Ayrıca koroziif ortamlarda dahi çok uygun yorulma dayanımları vardır. Tavsiyelere dikkat ederek uygulanması halinde kaynak

yapılması kolaydır. Genellikle kimyasal aparat imalatında, arıtma tesislerinde ve deniz veya off-shore teknolojisinde kullanılır.

Başlıca özellikleri;

- Gerilmeli korozyona karşı yüksek dayanıklılığa sahiptirler.
- Klor iyonunun bulunmadığı ortamlarda daha yüksek korozif dayanım gösterirler.
- Östenitik ve ferritik çeliklerden daha yüksek mekanik dayanım sağlarlar.
- İyi kaynak edilebilirlik ve şekil alma kabiliyeti vardır.

4.2.5 Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler

Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler alaşım elementi olarak alüminyum veya titanyum metali içermektedir. Çökelme sertleşmesi yaşlandırma olarak adlandırılan bir ısıl işlem uygulamasıdır. Alaşım elementi parçacıkları 980°C ile 1040°C civarı 19 sıcaklıkta ergiyen çözelti içinde çözünür. Elde edilen aşırı doymuş çözeltinin soğutma hızına bağlı olarak çeliğin tane yapısında değişmektedir. Soğuma tercihe bağlı olarak havada, suda ya da yağda tercih edilmektedir. Soğuma hızlı gerçekleşirse ince taneli, soğuma yavaş gerçekleşirse kaba taneli bir yapı oluşmaktadır. Soğuma sırasında partikül olarak çökelen parçacıklar yapının dayanım özelliklerini arttırmaktadır. Alaşım miktarlarına bağlı olarak oluşan matriks malzemelerine göre östenit, yarı östenit ve martenzitik çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler olarak gruplandırılmaktadır.

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada 1.4021 (x20Cr13) ve 1.4057 (X17CrNi16-2) martenzitik paslanmaz çelikleri kullanılmıştır. Kullanılan çeliklerin kimyasal içeriği ve kalitesi aşağıdaki Tablo 5.1'de görebilirsiniz. Numuneler Ø30mm, 150mm boyutlarında hazırlanmıştır.

Tablo 5.1: AISI 420 ve AISI 431 paslanmaz çeliklerin kalitesi.

Uluslararası Standardı AISI 420-431							
AISI No	W-Nr-Standard			DIN			
420	1.4021			X20Cr13			
431	1.4057			X17CrNi16-2			
AISI 420 Kimyasal İçeriği (%wt)							
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
0.16 - 0.25	max 1.5	max 0.04	max 0.015	max 1	12 - 14	-	-
AISI 431 Kimyasal İçeriği (%wt)							
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
0.12-0.20	Max 1	Max 0.04	0.03	Max 1	15.0- 18.0	2.0- 3.0	

İşlem prosesinde kullanılan lazer ünitesi Laserline GMBH; LDF 4000-100, NdYaG 4.4kW ve 15x15 spot genişliğinde kullanılmıştır. Lazer ünitesinin dalga boyu 980-1020 mm'dir. Lazer ışının yönlendirilmesi Kuka KR120 R3900 6 eksenli robot ile yapılmaktadır. 15x15 spot genişliğinde lazer ışınının maksimum verimde çalıştırmak için 285 mm mesafeden proses gerçekleştirilmektedir. İşlem öncesinde lazer sertleştirme yapılacak yüzeyler özel temizleyici solvent ile temizlenmiştir. İşlem sırasında her bir farklı parametre çalışması tek pasoda yapılmıştır. Lazer sertleştirme sonrasında

malzemeye herhangi bir soğutma yapılmamıştır. Malzemenin kendi ısı iletkenliği kullanılarak lazer sertleştirme yapılmıştır. Lazer sertleştirmenin en büyük parametre değişkenleri lazer gücü ve lazer ışının hareket hızıdır.


Yapılan çalışmalarda her bir deneme numunesinde sertlik ölçümleri ve homojen sertlik ölçümleri ultrasonik sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Yedi farklı çalışma sonucunda standart metalografi hazırlıkları yapılmıştır. Lazer sertleştirilmiş malzemeler enine kesilmiştir ve ince kesme yapılmıştır. Daha sonrasında malzemeler sıcak bakalite alınmıştır. Sırasıyla 1600, 1200, 800 ve 240 zımpara ile yüzey parlatılmıştır. Daha sonrası mikro yapı incelemesi için %4 nital ile dağlanmıştır. Lazer ile sertleştirilen bölgeler elektron mikroskobu (SEM-EDX) ile incelenmiştir.

5.2 AISI 420(A Numunesi) Deney Sonuçları

AISI 420 (A Numunesi) malzemesinin farklı parametre çalışmaları Tablo 5.2’de verilmiştir. Optimum parametre çalışması yapılabilmesi için parametreler minimum 970°C en fazla 1080°C sıcaklıkta tutulmuştur. Hareket hızı ise en az 4mm/s en fazla ise 9 mm/s değerleri arasında yapılmıştır. Bu değerler işlem yapılan sistemin endüstriye yaptığı çalışmalara karşılık belirlenmiştir.

Tablo 5.2: Lazer sertleştirme parametreleri.

Numuneler	Güç (°C)	Tarama Hızı mm/s
A1	970	5
A2	1020	5
A3	1080	5
A4	970	7
A5	970	9
A6	1020	4
A7	1020	6



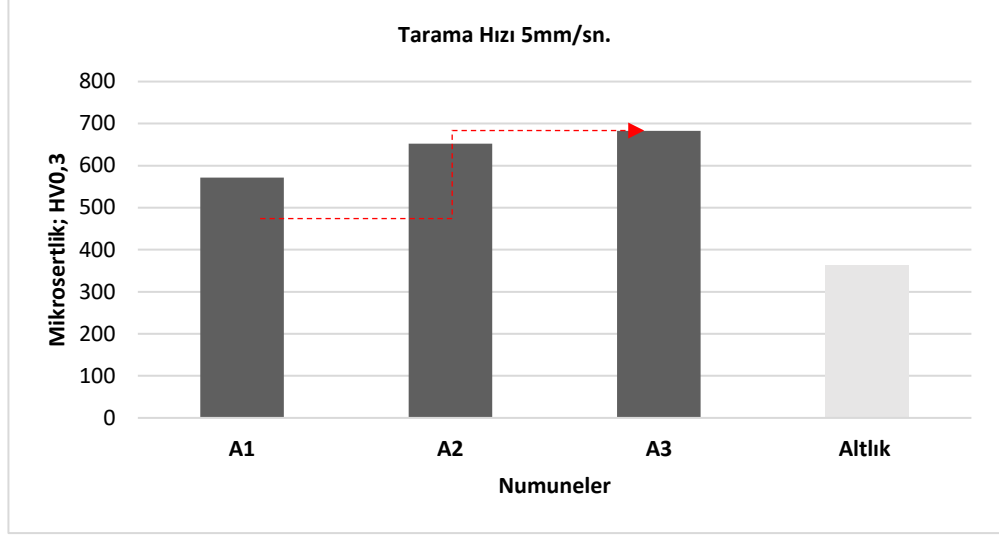
Lazerle sertleştirilen bölgeler incelendiğinde üç bölgeye ayrıldığı görülmüştür. Sertleşen bölge, ısı tesiri altında kalan bölge ve ana malzeme olmak üzeridir. Sertleştirilen bölgelerin yedi farklı parametreye göre sertlik değerleri aşağıdaki Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3: AISI 420 numunelere ait HV sertlik değerleri.

Numuneler	HV _{0,3}			HV
A1	498	641	575	570
A2	654	641	662	652
A3	669	691	689	683
A4	614	568	571	584
A5	602	594	596	597
A6	619	612	606	612
A7	655	692	687	678
Altlık	352	371	363	362

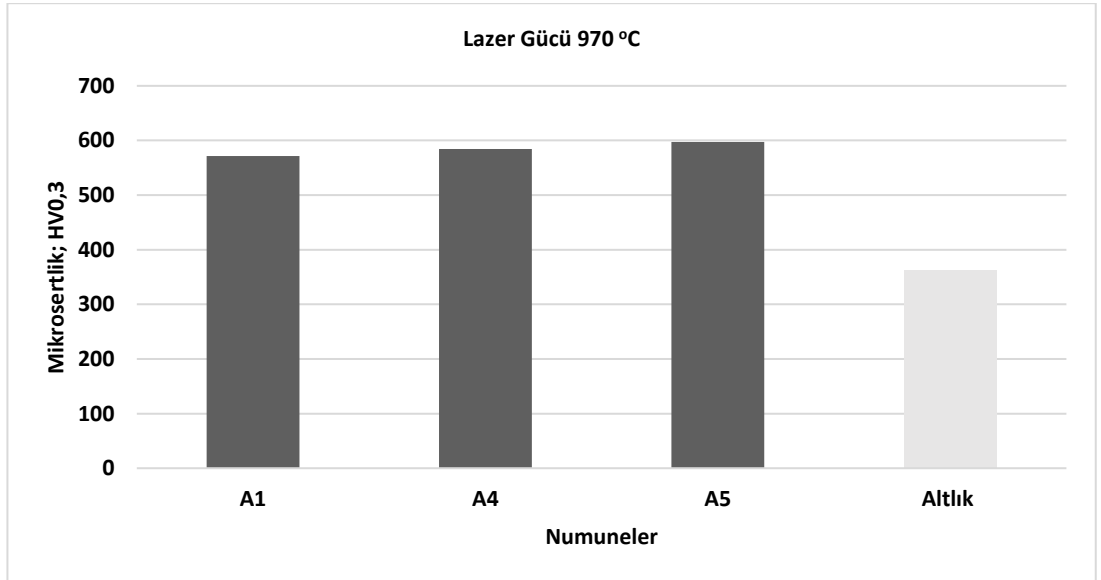
Lazer gücü ve tarama hızı eşdeğer değişken olarak çalışmaktadır. 15x15 spot genişliğinde lazer ışınının toplam yoğunluğu sertlik derinliğini ve malzemenin soğuma hızını etkilemektedir. 420 paslanmaz çeliğin karbon oranının düşük olması sebebiyle martenzitik dönüşüm hızlı gerçekleşecektir. Östenitik bölgede lazer ışının hareket ettiği lokal alanı maksimum yoğunlukta ve maksimum hızda soğutmak gerekmektedir. Yapılan çalışmada 970 °C altındaki sıcaklıklarda malzeme yüzeyinde homojen bir dağılım olmadığı ve martenzitik dönüşüm için yeterli olmamıştır. 1080 °C üzerinde lazer ışınının yoğunlu fazla gelmiştir ve malzemenin soğuma hızı yavaşlamıştır ve martenzitik dönüşüm gerçekleşmemiştir. 15x15 spot genişliğinde en verimli tarama hızı 5 mm/s'dir. Tablo verilen yedi farklı numuneye ait sertlik değerlerinde A1, A2 ve A3 numunelerinde 5 mm/s'de farklı sıcaklık değerlerinde karşılaştırılmıştır. Şekil 5.1'de karşılaştırmaları görebilirsiniz.

Östenit bölgede tutma sıcaklığı arttıkça ortalama sertlik değeri artmıştır ve sertlik homojen şekilde dağılmıştır. Tarama hızının sabit kalması ve gücün artırılmasıyla hem sertlik artışı hem sertlik derinliği artırılmıştır. Şekil 5.1'de A3 numunesi A1 numunesine göre ortalama 113 HV, A2 numunesine göre 31 HV sertlik artışı olmuştur. Yedi farklı parametrelerden en yüksek A3 numunesine ait 683 HV sertlik elde edilmiştir.



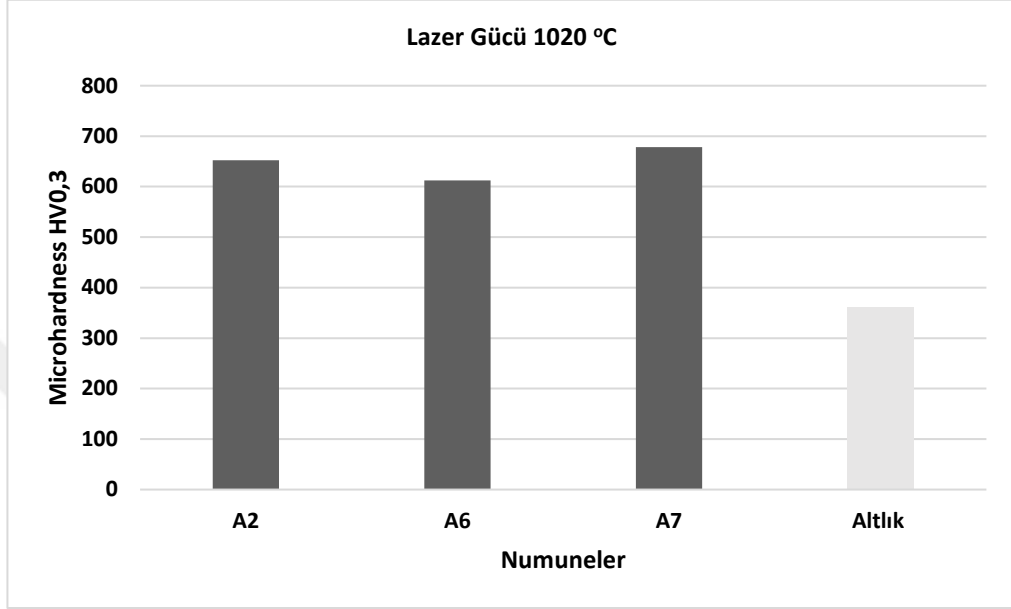
Şekil 5.1: 5mm/s tarama hızındaki A1, A2 ve A3 numunelerin sertlik değerleri.

Şekil 5.2’de 970 °C sıcaklıkta farklı tarama hızlarında gerçekleştirilmiştir. 5, 7 ve 9 mm/sn tarama hızlarında lazerin yüzeye olan yoğunluğu hızlı bir şekilde gerçekleştiğinden dolayı soğuma hızı artmıştır ve sertlik değeri yükselmiştir fakat lazer ışının yoğunluğu azaldığından dolayı sertlik derinliği azalmıştır. 570 HV sertlikten 597 HV sertliğe çıkmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda majör bir sertlik farkı oluşmadığından dolayı sertlik derinliği önem arz edecektir.



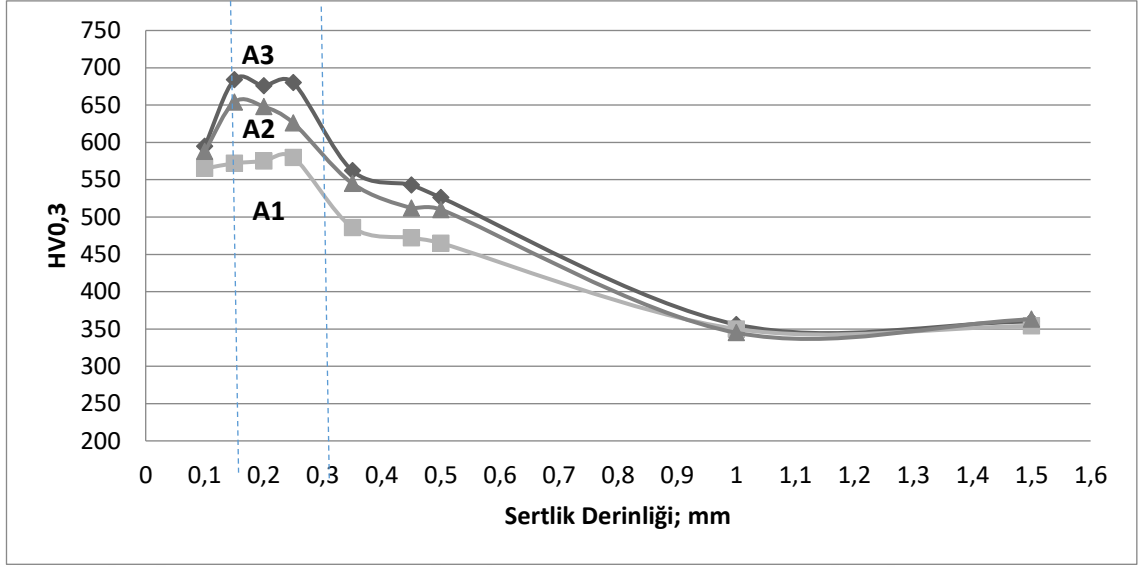
Şekil 5.2: 970 °C’de A1, A4 ve A5 numunelerin farklı hızlardaki sertlik değerleri.

1020 °C sıcaklıkta farklı tarama hızlarında gerçekleştirilen HV sertlik değerleri şekil 5.3'te verilmiştir. Tarama hızı düştüğünde sertlik değerinin azaldığını, tarama hızının arttığında ise sertlik değerleri yükselmiştir. A6 numunesinde 4 mm/s tarama hızından 612 HV'den, A7 numunesinde 6 mm/s tarama hızında 678 HV sertlik elde edilmiştir.



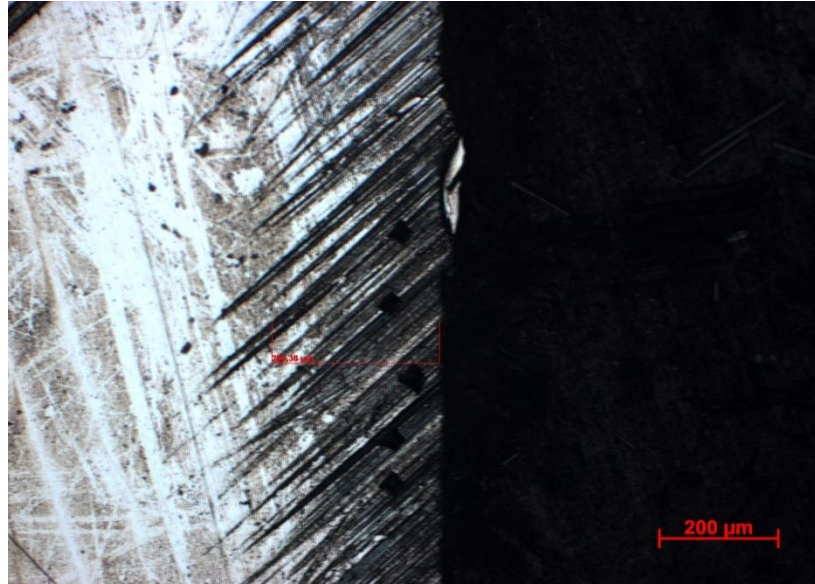
Şekil 5.3: 1020 °C 'de A2, A6 ve A7 numunelerin farklı hızlardaki sertlik değerleri.

Aşağıdaki Şekil 5.4'te A1, A2 ve A3 numunelerine ait lazer ile sertleştirilmiş bölgelerin sertlik derinlikleri verilmiştir. Yüksek sertlik değerleri 0.2- 0.3 mm sertlik derinliği elde edilmiştir. 0.3 mm sertlik derinliğinden itibaren sertlik değerleri düşmüştür. 420 paslanmaz çeliğin sertlik değerlerinin değişmesi incelendiğinde maksimum sertlik derinliği 1 mm olduğu görülmüştür.



Şekil 5.4: Lazer ile sertleştirilen bölgelerin sertlik derinlikleri.

Şekil 5.5'te AISI 420 paslanmaz çeliğin enine kesit bölgesi gösterilmiştir. Bu SEM görüntüsünde vickers ile ölçülen baklalar ve sertleştirilmiş bölgeler gözükmemektedir. Lazer sertleştirme yapılan AISI 420 paslanmaz çeliğinin ham malzeme sertliğine göre %95 sertlik değeri arttırılmıştır.

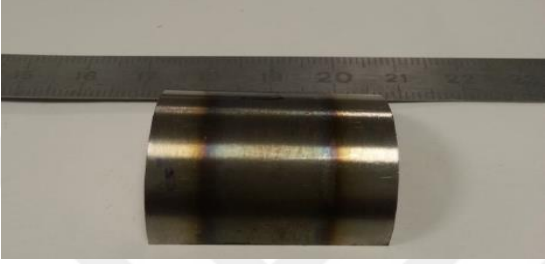


Şekil 5.5: A3 numunesinin SEM görüntüsü.

5.3 AISI 431(B Numunesi) Deney Sonuçları

AISI 420 çeliğine uygulanan parametre çalışmaları esas alınarak optimum parametreye ulaşılmaya çalışılmıştır. AISI 431(B Numunesi) çeliği için yapılan parametreler Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4: AISI 431 numunelere ait HV sertlik değerleri.

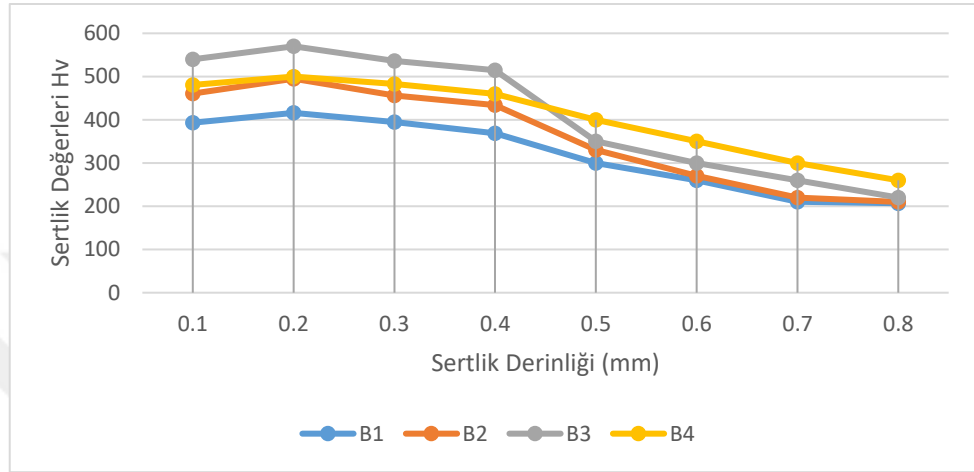
	Numuneler	Güç (°C)	Tarama Hızı mm/s
	B1	1020	6
	B2	1080	5
	B3	1020	4
	B4	1080	4

AISI 431 çeliğinin lazer sertleştirme sonrasında aldığı sertlik değerleri aşağıdaki Tablo 5.5'te verilmiştir. Yapılan lazer sertleştirme sonucunda malzeme üzerinde lazer ışının yansımaya yaptığı ve hareket hızının düşürülerek daha yüksek sertlik elde edildiği görülmüştür. Altlık sertlik değerine göre yaklaşık 2,5 kat sertlik artışı olmuştur.

Tablo 5.5: AISI 431 numunelerine ait HV sertlik değerleri.

Numuneler	HV _{0,3}			HV
B1	395	416	369	393
B2	434	456	495	461
B3	515	536	570	540
B4	460	483	500	481
Altlık	208	225	229	220

Şekil 5.6’da verilen grafikte AISI 431 malzemesine ait numunelerde besleme hızı arttığında sertlik derinliklerinde düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Lazer gücünün artış sağlandığında ise 1020 °C’den sonra sertlikte düşüş olduğu gözlemlenmiştir fakat sertlik derinliğinde artış olmuştur. Lazer gücünün ve lazerin besleme hızıyla doğru orantılı olarak sertlik değerleri ve sertlik derinliği optimum değer B3 numunesinde sağlanmıştır.



Şekil 5.6: AISI 431 numunelerinin lazer ile sertleştirilen bölgelerin sertlik derinlikleri.

BÖLÜM 6. SONUÇ

Lazer sertleştirme yapılarak sertlik değerinde artış görülmüştür. İşlem yapılan yüzeyin sertlik değerleri kademeli olarak ana malzemeye doğru azalmaktadır. Lazer gücünün östenit sıcaklığı için ve tarama hızı prosesin en büyük etkenidir. Yapılan deneysel çalışmada en yüksek sertlik değerleri A3 numunesine ait 1080 °C ve 5 mm/s ile 683 HV sertlik elde edilmiştir. Tarama hızının artması ile malzemenin soğuma hızı arttığı gözlemlenmiştir. Lazer gücünün artmasıyla östenit sıcaklığını artması malzemenin sertlik değerlerini yükselmiştir. Tarama hızının ve östenit bölgesinin sıcaklığı artırılarak yüksek sertlik değeri ile daha dar sertlik derinliği elde edilmiştir. Böylece distorsiyon riskini en aza indirmiş olacaktır. Proses sonucunda ekstra bir soğutma kullanılmaması diğer sertleştirme yöntemlerine göre avantaj sağlamaktadır.

Geleneksel fırın yöntemlerinde AISI 420 paslanmaz çeliğine ısıtma işlemi çalışmalarında soğutma olarak su, yağ ve hava kullanılmaktadır. Aşağıdaki Tablo 6.1'de yapılan soğutma çeşidine göre ve lazer sertleştirme sonucunda AISI 420 paslanmaz çeliğinin sertlik değerleri verilmiştir.

Tablo 6.1: Geleneksel fırın ile lazer sertleştirmenin AISI 420 paslanmaz çeliğin sertlik karşılaştırması (Mahmoudi, 2010).

Isıl İşlem Yöntemi	Isıl İşlem Sonrası Soğutma	Sertlik Değerleri (HV)
Fırın Ortamı	Yağ	528 HV
Fırın Ortamı	Su	560 HV
Fırın Ortamı	Hava	513 HV
Lazer Sertleştirme	-	683 HV

Fırın ortamında su ile yapılan soğutma sonucunda AISI 420 paslanmaz çelikte 560 HV ile yüksek sertlik elde edilmektedir. Fakat su ile soğutulan malzemelerde mikro çatlaklar görülmüştür. Yağ ve hava ile soğutulma yapılmaktadır. Yağ ile soğutulan malzemeler

maksimum 528 HV sertlik almaktadır. Lazer sertleştirme 1,3 katı sertlik artışı sağlanmıştır.

Aşağıdaki tabloda ise AISI 431 paslanmaz çeliğin fırın ortamında ve lazer sertleştirme sertlik değerlerine ait çalışmaları göstermektedir.

Tablo 6.2: Geleneksel fırın ile lazer sertleştirmenin AISI 431 paslanmaz çeliğin sertlik karşılaştırması (Rajasekhar, 2015).

Isıl İşlem Yöntemi	Isıl İşlem Sonrası Soğutma	Sertlik Değerleri (HV)
Fırın Ortamı	Yağ	425 HV
Lazer Sertleştirme	-	540 HV

AISI 431 çeliğinin lazer sertleştirme sonucunda B3 numunesinde en yüksek sertlik elde edilmiştir. Fırın ortamında 1050 °C östenitleme sonucunda 425 HV sertlik elde edilmektedir. Lazer sertleştirme ile AISI 431 çeliğinde 1,2 katı kadar sertlik artışı olmuştur.

Geleneksel fırın yöntemlerinde yüksek sıcaklık ve yüksek tutma süresi nedeniyle ferritik yapılar ince partiküllerle martenzitik alana bağlanmaktadır. Bu bağlanan ferritik yapılar çeliğin sertliğini ve mukavemetini düşürmektedir. Ferritik yapıları küçültüp ya da yok etmek için yüksek sıcaklık ve yüksek tutma süresi ile üstesinden gelinebilir. Fakat çekirdeğe kadar sertleştirilen çelik alaşımında çatlaklar görülecektir. Lazer sertleştirme prosesinde işlem prosesi saniyede 1000 K ısı değişimi ve robotik kontrol ile düzenli bir yapı elde etmek mümkündür. Yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızı ile ferritik yapılar minimize edilmiştir. Lazer sertleştirme sonucunda yüksek mukavemet ve yüksek sertlik elde edilmiştir. Malzemenin çalışan bölgesi lokal olarak sertleştirildiği için ve sertlik derinliği ortalama 1 mm derinlikte sınırdan kalması, homojen bir sertlik değeri oluşmasıyla malzeme ile sertleştirilen bölge kompozit yapı gibi davranış gösterecektir. Ana malzeme, ısı tesiri altında kalan bölge ve martenzitik bölge çalışma ortamlarına yüksek direnç gösterecektir. Sertleştirilmiş bölge üzerinde çalışan yüksek aşınma ve darbeye karşı dayanıklılığı alt bölgenin sünek olmasıyla malzemenin çatlama riskini ortadan kaldırılabilecektir. Malzemeye kazandırılan bu özellik dişli sektörde en büyük etkidir ve dişlerin kırılmasını engellemektedir.

KAYNAKLAR

- Ali S.A.S., Hussein A.H., Nofal A., Elnaby S.H. (2017). Characterization of a Laser Surface-Treated Martensitic Stainless Steel. *Materials*, 1-19. doi:10.3390/ma10060595.
- Aran, A., Temel M.A. (2004). *Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller* (Baskı 2, s10-13). İstanbul: Acar Matbaacılık.
- Chen T.L., Guan Y.H., Wang H.G., Zhang J.T. (1997). *Journal of Materials Processing Technology*. China: Department of Material, Kunming University of Science and Technology.
- Davis, J.R. (2002). *Surface Hardening of Steels: Understanding the Basic*. USA: ASM International.
- Dinesh Babu P. Balasubramanian K.R., Buvanashakaran G. (2011). Laser Surface Hardening: A Review. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 131-151. doi:10.1504/IJSURFSE.2011.041398.
- George E. Totten. (2006). *Steel Heat Treatment Handbook*. New York: CRC Press.
- Grum J. (2004). *Laser Surface Hardening*. University of Ljubljana. Doi:10.1201/97802039701928.ch16.
- Gutierrez E. (1989). A Mathematical Model of Laser Surface Hardening of Steel. *J. Heat Treat.* doi:10.1007/bf02833184.
- Hannweber, J., Bonss, S., Brenner, B., Beyer, E. (2004). Integrated Laser System for Heat Treatment With High Power Diode Laser. *The 23rd International Congress on Laser Materials Processing and Laser Microfabrication*. San Francisco, California, USA: October 4-7.
- Ingelgem V.Y., Vandendael I., Broek D., Hubin A., Vereecken J. (2007). Influence of Laser Surface Hardening on The Corrosion Resistance of Martensitic Stainless Steel. *Electrochimica Acta*, 52, 7796-780.
- Ion J. (2002). Laser Transformation Hardening. *Surface Engineering*, 14-31. doi:10.1179/0267084012250001228.
- Jae Ho L., Jeong Hwan J., Byeong., Don J., Young Myung S., Young Hoon M. (2008). Laser Surface Hardening of AISI H13 Tool Steel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. doi:10.1016/S1003-6326(08)60377-5.

- Khorram A., Davood Jamaloei A., Jafari A., Moradi M. (2019). Nd:YAG Laser Surface Hardening of AISI 431 Stainless Steel; Mechanical and Metallurgical Investigation. *Optics & Laser Technology*. doi:10.1016/j.optlastec.2019.105617.
- Kou S., Sun. D.K., Le P.Y. (1983). A Fundamental Study of Laser Transformation Hardening. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 14, 643-653.
- Krishna B.V., Bandyopadhyay. (2009). A Surface Modification of AISI 410 Stainless Steel Using Laser Engineered Net Shaping (LENSTM). *Materials&Design*, 1490-1496.
- Kulu, A., P. Viljus., M. Vallikivi., A. Latokartano. (2010). Microstructure And Wear Resistance Of The Laser Hardened Pm Tool Steel Vanadis 6. *The 7th International DAAAM Baltic Conference Industrial Engineering*. Tallinn, Estonia: April 22-24.
- Kusinski J., Kac S., Kopia A., Radziszewska A., Rozmus-Górnikowska M., Major B., Major L., Marczak J., Lisiecki A. (2012). Laser Modification of The Materials Surface Layer A Review Paper. *Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. doi: 10.2478/v10175-012-0083-9.
- Laser Hardening Application (t.y.). Erişim: 25 Temmuz 2021, <http://www.uniquetech.com.tr>.
- Mahmoudi B., M.J. Torkamany., A.R. Sabour Rouh Aghdam. (2010). Laser Surface Hardening of AISI 420 Stainless Steel Treated by Pulsed Nd:YAG Laser. *Materials&Design*, 2553-2560.
- Makoto S., Yuuki A., Hiroaki M. (2016). Application of Laser Hardening Technology to Sintered Parts. *Sei Technical Review*, 82, 66-69.
- MEB, (2011). *Isıl Yüzey Sertleştirme*. 5212MI234, Ankara.
- Miokovic T., V. Schulze., Vohringer., D. Lohe. (2007). Influence of Cyclic Temperature Changes on The Microstructure of AISI 4140 After Laser Surface Hardening. *Acta Materialia*, 589-599.
- Mohammed N. (n.d.). *Laser Heat Treatment*. Retrieved October 10, 2021, from <https://www.slideshare.net/JKLasers/laser-heat-treatment>.
- Mona Soodi. (2013). *Investigation of Laser Deposited Wear Resistant Coatings on Railway Axle Steels*. School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering RMIT University.
- Moradi, M., H. Arabia., S. Jamshidi Nasaba., K. Y. Benyounis. (2019). A Comparative Study of Laser Surface Hardening Of AISI 410 and 420 Martensitic Stainless Steels by Using Diode Laser. *Optics & Laser Technology*, 111: 347-357.
- Muvunzi R., Dimitrov D., Matope S. (2018). *Application of Surface Modification Technologies to Improve Performance of Hot Sheet Metal Forming Tool A review*. University of Stellenbosch, South Africa.
- Narendra B. Dahotre., Samant A. (2011). *Laser Machining of Advanced Materials*. New York: CRC Press.

- Orlich V.J., Rose A., Wieast P. (1975). Atlas Zur Warmebehandlung Der Stahle. Band 3: Zeit-Temperatur-Austenitisierung-Schaubilder. *Materials Science&Engineering Technology*, 225: 215. doi:10.1002/mawe.19750060607.
- Palabıyık, O. (2013). *Soğuk Deformasyonun AISI 304 ve AISI 204Cu Kalite Paslanmaz Çeliklerin Mikro Yapılarına, Mekanik Özelliklerine ve Korozyon Davranışlarına Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Pantsar H. (2004). Use Of Dic Imaging in Examining Phase Transformations in Diode Laser Surface Hardening. *The 23rd International Congress on Laser Materials Processing and Laser Microfabrication*. San Francisco, California, USA: October 4-7.
- Roland D. (2016). Training Erlas HARD+CLAD. *Training ERLASER*.
- Schenider M.J., Chatterjee M.S. (2013). Introduction to Surface Hardening of Steels. *Steel Heat Treating Fundamentals and Processes*, 389-398. doi:10.31399/asm.hb.v04a.a0005771.
- Soy, U. (2014). *1000 Soruda Malzeme Bilimi*. İstanbul: Melisa Matbaası.
- Tianmin S., Meng H., Yuen H. T. (2003). Impact Wear Behavior of Laser Hardened Hypoeutectoid 2Cr13 Martensite Stainless Steel. *Wear*, 255, 444-455.
- Vollertsen F., Partes K., Meijer J. (2005). State of the Art of Laser Hardening and Cladding. *The 3th International WLT Conference on Lasers in Manufacturing*. Münih, Germany: June 13-16.
- URL-1 <<http://www.uniquetech.com.tr>>, erişim tarihi 25.06.2021.
- URL-2 <<http://www.borsenboru.com>>, erişim tarihi 15.09.2021.
- URL-3 <<http://www.askaynak.com.tr>>, erişim tarihi 20.09.2021.
- URL-4 <<http://www.flametreatingsystems.com>>, erişim tarihi 05.11.2021.
- URL-5 <<http://www.industrialheating.com>>, erişim tarihi 07.11.2021.
- .