

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**AISI 304L PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN LAZER
KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMESİNDE NİTRASYON
İŞLEMİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

MEHMET ÇOBAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ HAKAN ADA

EYLÜL - 2023

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Mehmet ÇOBAN tarafından hazırlanan “**AISI 304L PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN LAZER KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMESİNDE NİTRASYON İŞLEMİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **08.09.2023** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	D. Öğr. Üyesi Hakan ADA Gazi Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Arif UZUN Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ Gazi Üniversitesi	

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü V.

Doç. Dr. Osman ÇİÇEK

.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Mehmet ÇOBAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AISI 304L PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN LAZER KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMESİNDE NİTRASYON İŞLEMİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

MEHMET ÇOBAN

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN:DR. ÖĞR. ÜYESİ HAKAN ADA

Geniş kullanım olanağı bulunan ve birçok fayda sağlayan nitrasyon işleminin östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak işlemiyle birlikte ele alındığı, “AISI 304L Paslanmaz Çelik Malzemelerin Lazer Kaynağıyla Birleştirilmesinde Nitrasyon İşleminin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması” başlıklı bu tez çalışmasında; otomotiv, uzay, havacılık, üretim, sağlık, gıda ve savunma endüstrisi gibi birçok alanda kullanılan östenitik paslanmaz çeliklerin lazer kaynağıyla birleştirilmesi ve nitrasyon işleminin lazer kaynağına etkileri araştırılmıştır.

Lazer kaynak yöntemiyle, 3 farklı güç parametresinde birleştirilen AISI 304L östenitik paslanmaz çelik numunelere yapılan mekanik testlerde optimum sonuçların 1500 Watt güç ile birleştirilmiş numunede olduğu görülmüştür. Optimum kaynak parametresi belirlendikten sonra numunelere kaynak öncesi ve kaynak sonrası nitrasyon işlemleri uygulanarak, nitrasyon işleminin kaynak işlemi üzerindeki etkileri mikroyapı ve mekanik özellikler bakımından araştırılmıştır. Lazer kaynağı ve nitrasyon işlemine tabi tutulan AISI 304L östenitik paslanmaz çelik malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çekme, eğme ve sertlik deneylerinden faydalanılmıştır. Mikroyapısal özellikler ise optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemelerden alınan görüntüler yardımıyla yorumlanmıştır.

ANAHTAR KELİMELE:Lazer Kaynağı, Paslanmaz Çelik, AISI 304L, Nitrasyon

Eylül 2023, 89 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF NITRIDING PROCESS ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES IN JOINING AISI 304 L STAINLESS STEEL MATERIALS WITH LASER WELDING

MEHMET ÇOBAN

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. HAKAN ADA**

In this thesis study titled "Investigation of the Effect of Nitriding Process on Microstructure and Mechanical Properties in Joining AISI 304L Stainless Steel Materials with Laser Welding", in which the nitriding process, which has a wide range of applications and provides many benefits, is discussed together with the welding process of austenitic stainless steels, the joining of austenitic stainless steels used in many fields such as automotive, aerospace, aviation, manufacturing, health, food and defense industries with laser welding and the effects of nitriding process on laser welding have been investigated.

In the mechanical tests performed on AISI 304L austenitic stainless steel specimens joined by laser welding method at 3 different power parameters, it was observed that the optimum results occurred in the specimen joined with 1500 Watt power. After determining the optimum welding parameter, the samples were subjected to pre-weld and post-weld nitriding processes and the effects of nitriding on the welding process were investigated in terms of microstructure and mechanical properties. Tensile, bending and hardness tests were used to determine the mechanical properties of AISI 304L austenitic stainless steel materials subjected to laser welding and nitriding processes. The microstructural properties were interpreted with the help of images obtained from optical microscope and scanning electron microscope (SEM) examinations.

KEYWORDS:Laser Welding, Stainless Steel, AISI 304L, Nitriding

September 2023, 89 Page

TEŞEKKÜR

Kastamonu Üniversitesi'nde yüksek lisans yapmam konusunda beni teşvik eden, akademik kariyerimin ilerlemesi ve bu çalışmanın planlanması ile araştırılmasında beni yönlendiren, engin bilgi donanımları ve tecrübeleriyle çalışmamı bilimsel olarak aydınlatan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA'ya;

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübeleri ile bizlerin eğitim ve öğretim hayatımıza katkı sağlayan, üzerimizde büyük emekleri olan Sn. Doç. Dr. Arif UZUN'a ve jüri üyesi Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ'ye ;

Tez çalışmalarını yürüttüğüm Setuay Eskişehir Lazer firmasına, Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi'ne, OSB'ye bağlı MEGEM Test Laboratuvarına ve Korkmaz Çelik firmasına,

Manevi desteklerinden ötürü aileme,

En içten dileklerimle teşekkür ederim.

MEHMET ÇOBAN

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. PASLANMAZ ÇELİKLER.....	3
2.1 Çeliklerin Tarihçesi.....	3
2.1.1 Paslanmaz Çelikler	3
2.1.2 Paslanmaz Çelik Çeşitleri	4
2.1.2.1 Ferritik paslanmaz çelikler	7
2.1.2.2 Martensitik paslanmaz çelikler	7
2.1.2.3 Östenitik paslanmaz çelikler	8
2.1.2.4 Ferritik - Östenitik (dubleks) paslanmaz çelikler	8
2.1.2.5 Çökelme ile sertleşen paslanmaz çelikler	9
2.1.3 Alaşım Elementlerinin Çeliğin Yapısına Etkileri	9
2.1.4 Uygulama Alanlarına Göre Çelikler	10
2.1.5 AISI 304L Paslanmaz Çelikler	10
3. ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER	12
3.1 Tavlama.....	13
3.1.1 Yumuşatma Tavlaması	13
3.1.2 Gerilim Giderme Tavlaması	14
3.1.3 Kristalleştirme Tavlaması	14
3.1.4 Normalleştirme Tavlaması.....	14
3.2 Sertleştirme	14
3.2.1 Suda Sertleştirme	15
3.2.2 Yağda Sertleştirme.....	15
3.2.3 Havada Sertleştirme	15
3.3 Yüzey Sertleştirme	15
3.3.1 Sementasyon	15
3.3.2 İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme.....	16
3.3.3 Nitasyon.....	16
4. LAZER KAYNAĞI.....	23
4.1 Lazer Kaynağı ve Özellikleri	23
4.1.1 Lazer Kaynağı	23
4.1.2 Lazer Kaynağının Tanımı ve Temel Elemanları	24
4.1.2.1 Lazer kaynağının tanımı	24
4.1.2.2 Lazer kaynak cihazlarının temel elemanları ve özellikleri	24
4.1.3 Lazer Kaynak Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	25
4.1.3.1 Lazer kaynak yönteminin avantajları	25

4.1.3.2	Lazer kaynak yönteminin dezavantajları	26
4.1.4	Lazer Kaynağı Kesitin Tipik Görünümü ve Oluşan Bölgeler	26
4.1.4.1	Ergime bölgesi (EB).....	27
4.1.4.2	Isı tesiri altındaki bölge (ITAB).....	27
4.1.4.3	Temel malzeme (TM)	27
4.2	Lazer Kaynak Yöntemleri.....	27
4.2.1	Derinlemesine Nüfuz Eden Lazer Kaynağı	28
4.2.2	İletimsel Lazer Kaynağı.....	29
4.3	Lazer Kaynağında Temel Kaynak Parametreleri	30
4.3.1	Lazer Gücü.....	31
4.3.2	Odaklama	33
4.3.3	Koruyucu Gaz	33
5.	LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	35
6.	YÖNTEM.....	41
6.1	Malzeme.....	42
6.2	Lazer Kaynak Cihazı.....	43
6.3	Lazer Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi	44
6.4	Nitrasyon İşleminin Uygulanması	47
6.5	Numunelerin İncelemeler İçin Hazırlanması	48
6.6	Çekme Testi	50
6.7	Eğme Testi	51
6.8	Metalografik Analiz	52
6.9	Mikrosertlik Testi.....	54
7.	BULGULAR VE TARTIŞMA	56
7.1	Metalografik Analiz Bulguları.....	56
7.1.1	Makroyapı İnceleme Bulguları	56
7.1.2	Mikroyapı İnceleme Bulguları.....	57
7.1.3	EDS İnceleme Bulguları	68
7.2	Mekanik Deney Bulguları.....	71
7.2.1	Çekme Testi Bulguları	71
7.2.2	Eğme Testi Bulguları	78
7.2.3	Vickers Mikrosertlik Deney Bulguları	80
8.	SONUÇ VE ÖNERİLER	83
8.1	Sonuçlar	83
8.2	Öneriler	84
	KAYNAKLAR	85
	ÖZGEÇMİŞ.....	89

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Schaeffer diyagramı	4
Şekil 2.2 Farklı paslanmaz çelik türleri için krom ve nikel miktarları.....	5
Şekil 2.3 Paslanmaz çelik türleri	6
Şekil 2.4 Paslanmaz çeliklerin iç yapıları	7
Şekil 3.1 Demir - Karbon Denge Diyagramı	13
Şekil 3.2 Isıl işlem fırınları.....	17
Şekil 3.3 Fe-N ikili faz diyagramı.....	18
Şekil 3.4 (a) γ -Fe ₄ N ve (b) ϵ -Fe ₃ N fazlarının kristal yapısı	19
Şekil 3.5 Nitrasyon prosesi şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.6 Gaz nitrasyonunun şematik gösterimi.....	21
Şekil 3.7 Lehrer diyagramı.....	22
Şekil 4.1 Lazer kaynak yönteminin şematik gösterimi	23
Şekil 4.2 Bir lazer kaynak makinesinin temel elemanları.....	25
Şekil 4.3 Lazer kaynak makinesinin gösterimi	28
Şekil 4.4 Lazer kaynağında anahtar deliği ve plazma oluşumunun şematik kesit görünüşü.	29
Şekil 4.5 İletimsel lazer kaynağı uygulaması.....	30
Şekil 4.6 Kalınlıklarına göre karbonlu çelik levhalar için kaynak hızının (CO ₂) lazer gücüne göre değişimi.....	30
Şekil 4.7 Odaklama düzeneği şekilsel görünümü.	31
Şekil 4.8 1 kW Nd:YAG lazerinin kaynak performansı	32
Şekil 4.9 Kaynak dikişi formu	32
Şekil 4.10 Lazer ışınının odaklanması, ayna veya lens kullanılması	33
Şekil 6.1 Nd:YAG Lazer Kaynak Cihazı	43
Şekil 6.2 FANUC Robot M16i B marka robotik kol	44
Şekil 6.3 Nd:YAG lazer kaynak işlemleri sırasında numunelerin sabitlendiği fıktür	44
Şekil 6.4 Lazer kaynağıyla birleştirilmiş plakanın ölçüleri	45
Şekil 6.5 Lazer kaynağıyla birleştirilmiş plakalar.....	45
Şekil 6.6 Nitrasyon işlemi görmüş plakalar	47
Şekil 6.7 Isıl işlem fırını.....	47
Şekil 6.8 Plaka üzerinden alınan numune ölçüleri	49
Şekil 6.9 Plakalardan kesilen numuneler	50
Şekil 6.10 Bir plakadan kesilen tüm inceleme numuneleri.....	50
Şekil 6.11 Çekme testi numune ölçüleri	51
Şekil 6.12 Alşı marka test cihazı	51
Şekil 6.13 Eğme testi numune ölçüleri	52
Şekil 6.14 Numune üzerinde eğme testinin uygulanması	52
Şekil 6.15 Zımparalama ve parlatma cihazı	53
Şekil 6.16 Nikon SMZ745T dijital görüntüleme cihazı.....	53
Şekil 6.17 Nikon Eclipse MA100 mikroskop	54
Şekil 6.18 FEI Quanta Feg 250 SEM dijital görüntüleme cihazı.....	54
Şekil 6.19 Sertlik ölçüm noktalarının şematik görüntüsü	55
Şekil 6.20 Metkon Duroline-M sertlik ölçüm cihazı	55

Şekil 7.1 Numunelerin makro görüntüleri	56
Şekil 7.2 1 numaralı deneye ait numunenin optik mikroskop görüntüleri	58
Şekil 7.3 2 numaralı deneye ait numunenin optik mikroskop görüntüleri	59
Şekil 7.4 3 numaralı deneye ait numunenin optik mikroskop görüntüleri	60
Şekil 7.5 4 numaralı deneye ait numunenin optik mikroskop görüntüleri	61
Şekil 7.6 5 numaralı deneye ait numunenin optik mikroskop görüntüleri	62
Şekil 7.7 1 numaralı deneye ait numunenin SEM görüntüleri	63
Şekil 7.8 2 numaralı deneye ait numunenin SEM görüntüleri	64
Şekil 7.9 3 numaralı deneye ait numunenin SEM görüntüleri	65
Şekil 7.10 4 numaralı deneye ait numunenin SEM görüntüleri	66
Şekil 7.11 5 numaralı deneye ait numunenin SEM görüntüleri	67
Şekil 7.12 Numune 1'e ait EDS grafiği	68
Şekil 7.13 Numune 2'ye ait EDS grafiği	69
Şekil 7.14 Numune 3'e ait EDS grafiği	69
Şekil 7.15 Numune 4'e ait EDS grafiği	70
Şekil 7.16 Numune 5'e ait EDS grafiği	71
Şekil 7.17 Çekme testi sonrası numuneler	73
Şekil 7.18 Çekme testi sonrası 1. numuneye ait akma, gerilme / uzama grafiği	74
Şekil 7.19 Çekme testi sonrası 2. numuneye ait akma, gerilme / uzama grafiği	75
Şekil 7.20 Çekme testi sonrası 3. numuneye ait akma, gerilme / uzama grafiği	75
Şekil 7.21 Çekme testi sonrası 4. numuneye ait akma, gerilme / uzama grafiği	76
Şekil 7.22 Çekme testi sonrası 5. numuneye ait akma, gerilme / uzama grafiği	76
Şekil 7.23 Eğme testi sonrası numuneler	78
Şekil 7.24 Eğme testi sonrası 1. numuneye ait görsel	79
Şekil 7.25 Eğme testi sonrası 2. numuneye ait görsel	79
Şekil 7.26 Eğme testi sonrası 3. numuneye ait görsel	79
Şekil 7.27 Eğme testi sonrası 4. numuneye ait görsel	80
Şekil 7.28 Eğme testi sonrası 5. numuneye ait görsel	80
Şekil 7.29 Sertlik testi sonuçlarına ait grafik	81

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 AISI 304L paslanmaz çelik kimyasal özellikleri	11
Tablo 2.2 AISI 304L paslanmaz çelik mekanik özellikleri.....	11
Tablo 6.1 Çalışmada kullanılan AISI 304L malzemenin kimyasal kompozisyonu...	42
Tablo 6.2 Deneylerde kullanılan AISI 304L malzemelerinin mekanik özellikleri....	42
Tablo 6.3 Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri	46
Tablo 6.4 Nitrasyon işlemine ait parametreler	48
Tablo 7.1 Numunelere ait çekme testi sonuçları.....	74
Tablo 7.2 Sertlik testi sonuçları	81

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al	: Alüminyum
Ar	: Argon
C	: Karbon
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
Fe 3C	: Sementit
MPa	: Mega paskal
N	: Azot
Ni	: Nikel
O	: Oksijen
P	: Fosfor
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
Ti	: Titanyum
γ-Fe	: Östenit
α-Fe	: Ferrit
δFe	: Delta ferrit
σ	: Mukavemet

Kısaltmalar

AISI	: American Iron and Steel Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials
Ceş	: Karbon eşdeğeri
DP	: Çift Fazlı
EB	: Ergime Bölgesi
FC	: Fırında soğuma
HV	: Vickers Hardness
HSLA	: Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler
ITAB	: Isı tesiri altında kalan bölge
LSS	: Düşük dayanımlı çelikler
Nd:YAG	: Neodymium Doped Yttrium Aluminum Garnet-Neodyum Katkılı İttriyum Alüminyum Garnet
PD	: Ortalama tepe güç yoğunluğu
PM	: Ortalama güç
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TM	: Temel Malzeme
TP	: Darbe süresi

1. GİRİŞ

Paslanmaz çelikler, korozyona karşı yüksek dayanım göstermesi nedeniyle makine sanayisi başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra kolay şekil verilebilmesi, kaynaklanabilir olması, yük altında çalışma özelliği, gelişmiş mekanik özellikleri, uzun ömürlü olması, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılmasına olanak sağlaması paslanmaz çeliği öne çıkaran özelliklerdir. Bu özellikleri barındıran AISI 304L östenitik paslanmaz çelikler, makine sanayiinde en yaygın tercih edilen malzemeler arasında yer alır.

Nitrasyon, malzemelerin yüzey mikroyapılarının değişimi ile mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılan termokimyasal bir yüzey işlemi olarak tanımlanır. Azot difüzyonu malzeme yüzeyinde mikroyapının değişimini sağlayarak sert bir tabaka oluşturur ve malzemenin mekanik özelliğinin değişmesini sağlar. Çeliklerin sürtünme ve aşınma katsayısındaki artışı, sertlik oranı yüksek olan nitrür tabakası elde edebilmek mümkündür. Nitrürlemenin düşük sıcaklıklarda uygulanabilmesi sayesinde malzemedeki bozulmalar da minimize edilmektedir. Bu nedenle çeliklerde nitrürleme işlemi, çok önemli bir yüzey sertleştirme işlemi olarak bilinmektedir.

Paslanmaz çeliklerde lazer kaynak işlemi son yıllarda giderek yaygınlaşmaktadır. İstenilen kaynak profilini elde edebilmek için kaynak dikiş şekli önem arz etmektedir. Kaynak dikişinin şekli, kaynağın parametreleri ve ısı girdisi ile ilişkilidir. Yüksek kaynak kalitesi ve hatasız kaynak işlemi için parametrelerin doğru belirlenmesi gerekmektedir.

Bu amaç doğrultusunda; ticari olarak temin edilen AISI 304L paslanmaz çelik saclara uygulanan lazer kaynağı ve nitrasyon işleminin kaynaklı birleştirme üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada 3 farklı güçte birleştirilen malzemeler için optimum güç belirlenmiştir. Daha sonra kaynak öncesi ve sonrasında nitrasyon işlemi gerçekleştirilen malzemelere optimum güçte lazer kaynağı uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Lazer kaynağı ile birleştirilen numunelerin mekanik ve mikroyapısal karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Mekanik karakterizasyon aşamasında birleştirmelerden alınan numuneler çekme, eğme ve sertlik testlerine tabi

tutulmuştur. Lazer kaynağı ve/veya nitrasyon işlemi uygulanan numunelerin mikroyapılarını araştırmak için optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) vasıtasıyla detaylı incelemeler gerçekleştirilmiştir.



2. PASLANMAZ ÇELİKLER

2.1 Çeliklerin Tarihçesi

18. yüzyılda İngiltere’de işlenmemiş demirin üretime alınmasıyla birlikte, demir farklı sektörlerde kullanılmak üzere tercih edilen bir ürün olmuştur. 1700’lü senelere kadar demiri işlemek için bol miktarda karbona ihtiyaç duyulmuş, karbon ihtiyacı ise odun kömüründen karşılanmıştır. Ancak Avrupa’da ormanlık alanların azalması sonucu demirin işlenmesi için farklı kaynak arayışına girilmiştir. Taşkömürü İngiltere’de bol miktarda olmasına rağmen yeteri kadar karbon içermediği için tercih edilmemiştir. Henry Cort, 1784 yılında dökme demiri eriterek oksidasyon ile cüruftan ayırma yöntemiyle yüksek kalitede dövme çelik üretimini gerçekleştirmiş ve bu sayede, çeliğin birçok alanda kullanılarak yaygınlaşmasına olanak vermiştir. (Tofur, 2017).

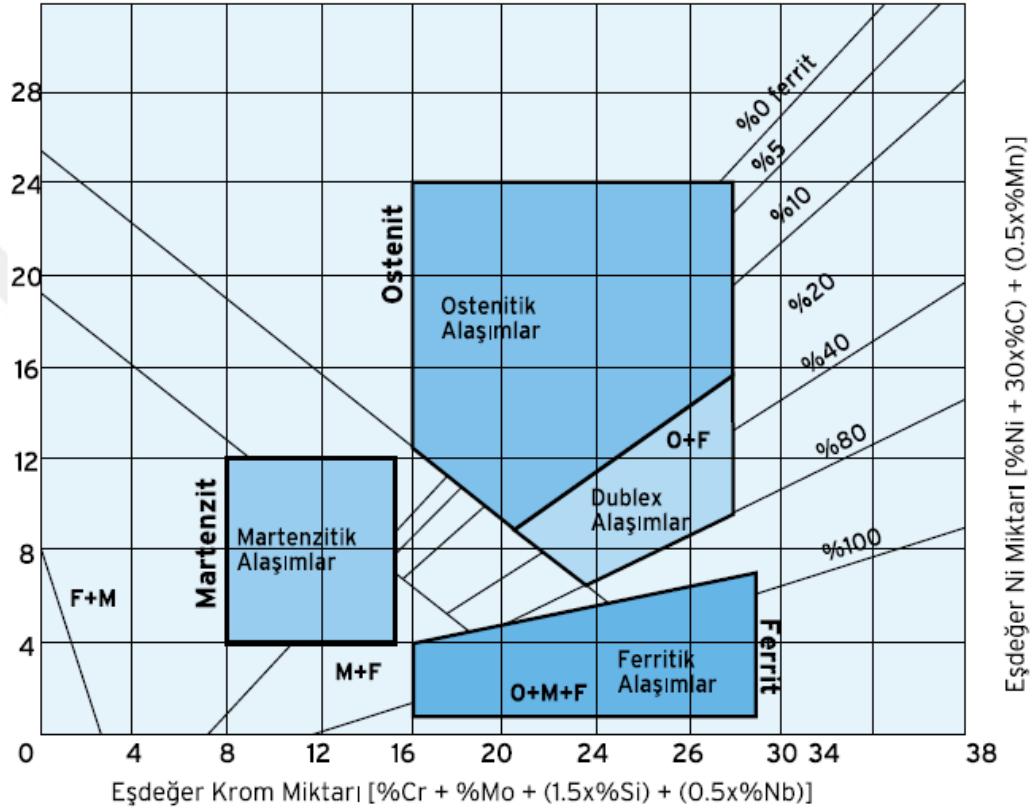
19. yüzyılda bu gelişimin devamında; Bessemer 1855 senesinde, Siemens-Martin 1864 senesinde, Thomas da 1879 senesinde ham demiri, sıvı durumda iken arıtarak “dökme çelik” üretimini sağlamıştır. 20. Yüzyıl içinde ise elektrikli fırınların keşfiyle çeliğin üretimi hızlıca artmıştır. Özellikle 1. ve 2. Dünya savaşları sırasında, tanklardan toplara, tüfeklerden gemilere, hatta nükleer bombalara kadar savaşlarda kullanılan çelik malzemeler imal edilerek, dünyada yıkıcı etkiler yaşanmıştır. Çelik malzemelerin gelişimine ayak uyduramayan ülkeler geri kalırken, gelişime sahip ülkeler ise üstünlüklerini kurmuşlardır (Tofur, 2017).

2.1.1 Paslanmaz Çelikler

Paslanmaz çelik, korozyona karşı direnç göstermesi sebebiyle farklı tipteki çeliklere verilen genel bir isimdir. Bu çelikler ortak olarak minimum %10,5 oranında krom ihtiva ederler. Korozyon direncini artırmak için nikel ve molibden elementleri ilave edilmiş olsa da, krom paslanmaz çeliklerde her zaman belirleyici element durumundadır.

Paslanmaz çeliklerin içyapısını oluşturan en önemli elementler; nikel, molibden ve mangandır. Krom ve nikel elementleri çeliğin iç yapısının ferritik veya östenitik

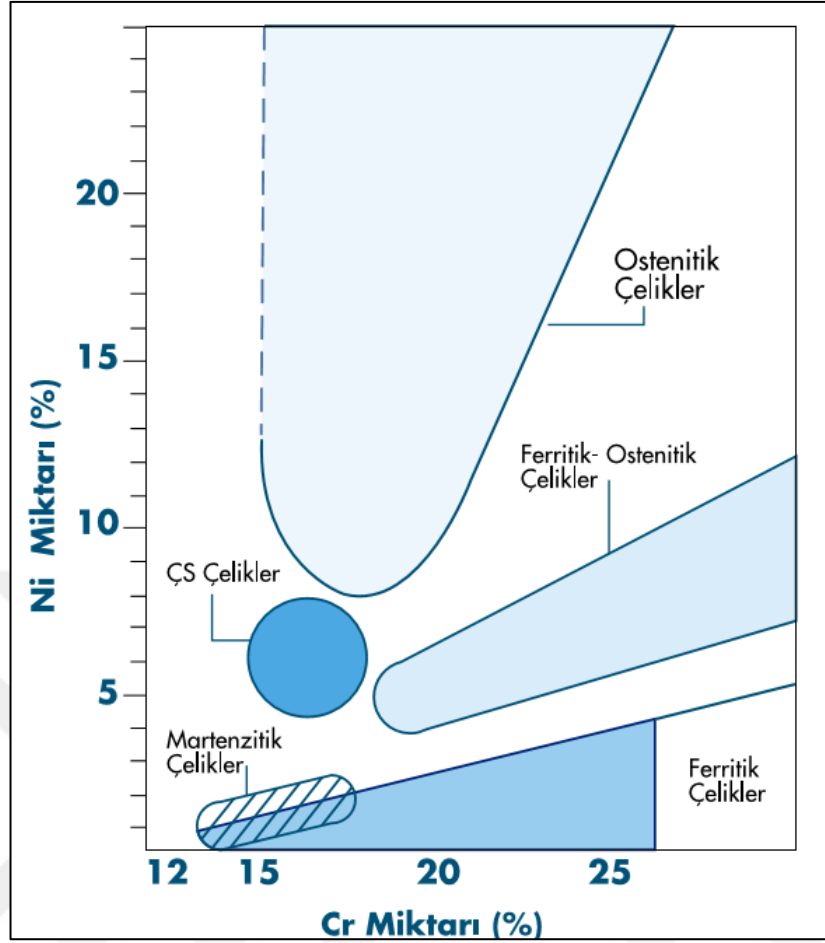
olmasını belirler. Schaeffler diyagramı (Şekil 2.1) farklı paslanmaz çeliklerin bileşim açısından yerlerini belirtmektedir. Ferrit alaşımları; krom, molibden, silisyum, titanyum, vanadyum ve niyobyum gibi karbür meydana getiren elementlerdir. Östenit alaşımları ise; azot, mangan, nikel ve karbon elementlerinden oluşur. (Aran ve Temel, 2004).



Şekil 2.1 Schaeffer diyagramı

2.1.2 Paslanmaz Çelik Çeşitleri

Paslanmaz çeliklerde kimyasal bileşenler değiştirilmek suretiyle değişik özellikler gösteren alaşımlar meydana getirilebilir. Krom miktarı artırılarak veya molibden - nikel gibi elementler ilave edilerek paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımı artırılabilir. Bunlara ilave olarak alüminyum, bakır, titanyum, niyobyum, kükürt, silisyum, selenyum ve azot gibi elementler kullanılarak elde edilen alaşımlar olumlu sonuçlar gösterir. (Aran ve Temel, 2004). Bazı çeliklerin krom ve nikel miktarları Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

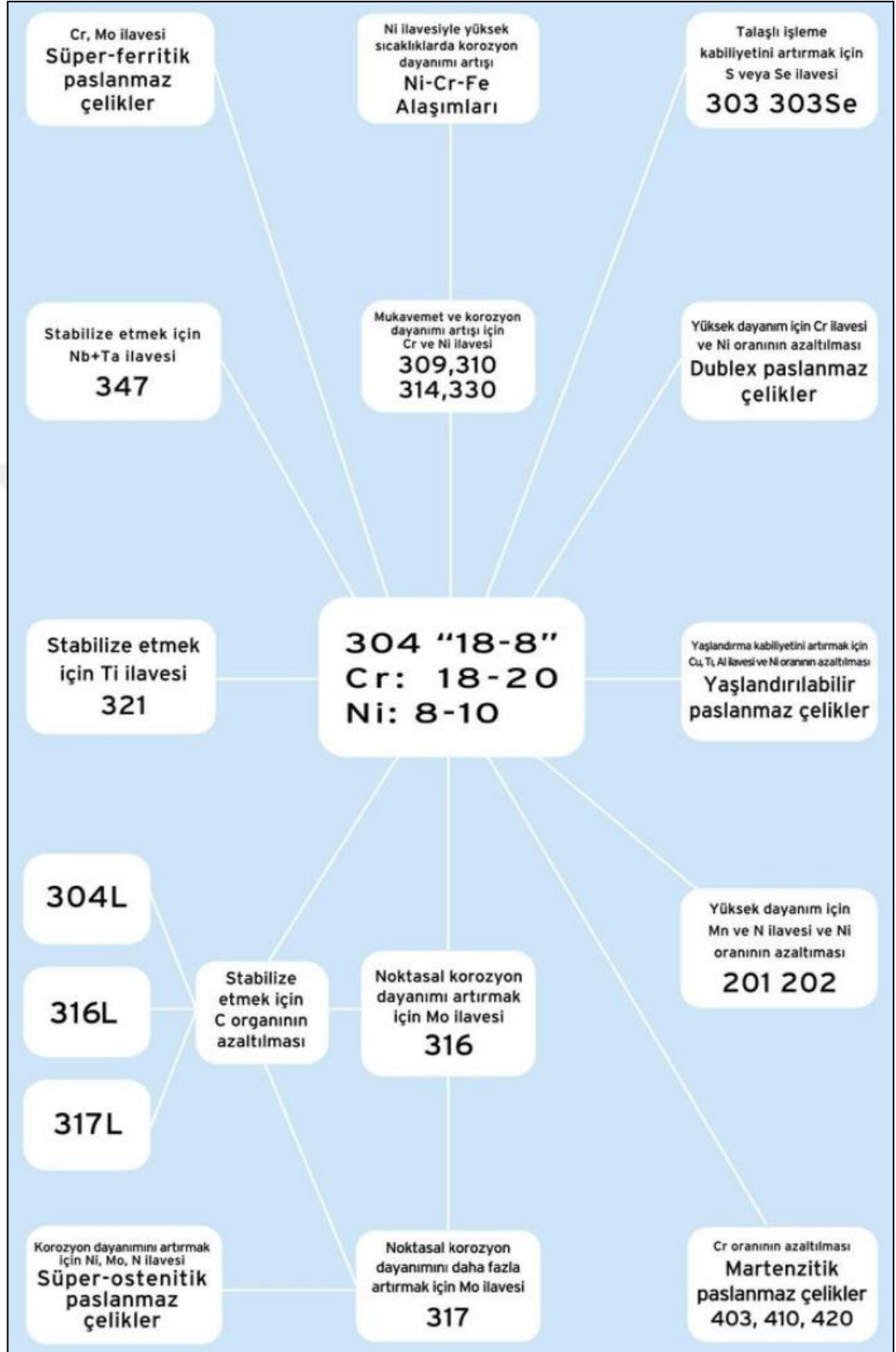


Şekil 2.2 Farklı paslanmaz çelik türleri için krom ve nikel miktarları

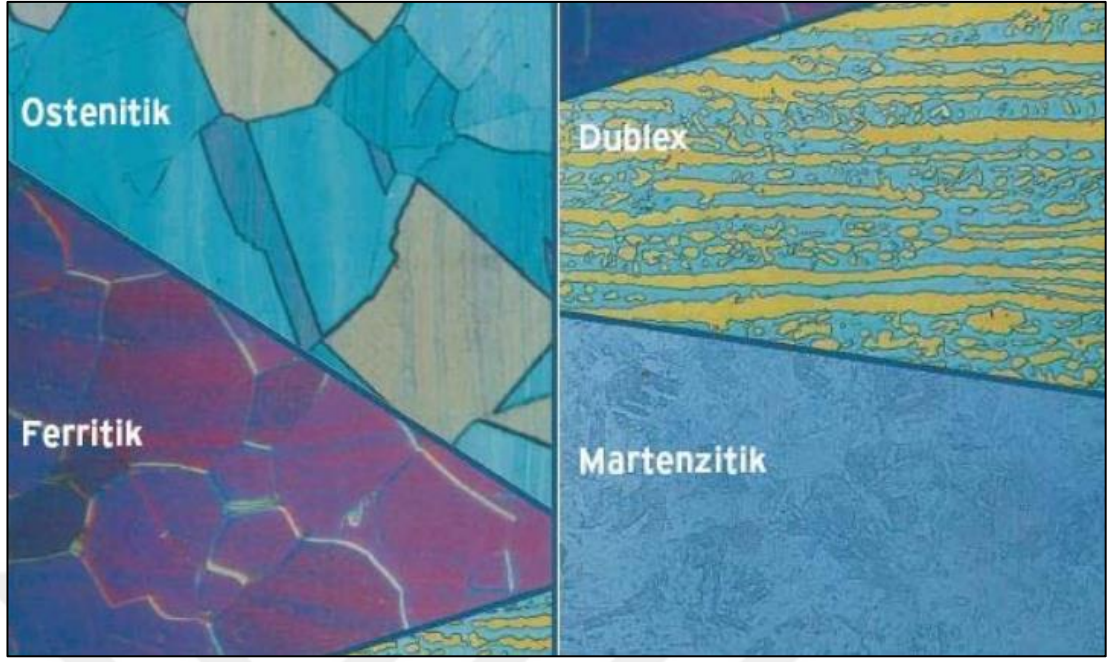
Paslanmaz çelikler, iç yapılarına göre 5 ana grupta toplanırlar.

- Ferritik paslanmaz çelikler
- Martensitik paslanmaz çelikler
- Östenitik paslanmaz çelikler
- Ferritik - Östenitik (dubleks) paslanmaz çelikler
- Çökeltme sertleşmesi ile oluşan paslanmaz çelikler.

Bu grupta paslanmaz çeliklerin en yaygın olanları östenitik ve ferritik paslanmaz çelikler olup, kullanım oranı bütün paslanmaz çeliklerin %95'ini oluşturmaktadır. Şekil 2.3'te paslanmaz çeliklerin türleri, Şekil 2.4'te ise paslanmaz çeliklerin iç yapıları şematize edilmiştir.



Şekil 2.3 Paslanmaz çelik türleri



Şekil 2.4 Paslanmaz çeliklerin iç yapıları

2.1.2.1 Ferritik paslanmaz çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler, karbon oranı düşük ve %12 - %18 oranında krom ihtiva eden paslanmaz çeliklere verilen addır.

Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Özellikleri:

- Östenitik çelikler gibi kolay şekillendirilememektedirler.
- Korozyona karşı dayanımı, krom oranının artırılmasıyla artmaktadır.
- Manyetik özelliktedirler.
- Isıl işlem uygulamasının, dayanım özelliğine katkısı olmamaktadır.
- Kaynaklanabilirlik özellikleri aşağı seviyededir.

2.1.2.2 Martensitik paslanmaz çelikler

%0,1'in üzerinde karbon miktarına sahip olan martensitik paslanmaz çelikler yüksek sıcaklık değerlerinde östenitik içyapıdadırlar. Östenitik sıcaklık derecesi çelik çeşitlerine göre 950-1050°C arasında değişim göstermektedir. Bu sıcaklık değerine sahip çelikler soğutulduğunda martensitik bir iç yapı oluşmaktadır. Böylece çeliğin sertlik ve mekanik dayanımı, bünyesindeki karbon yüzdesine paralel olarak artış

göstermektedir. Martensitik çelikler tavlanmış ya da ıslah edilmiş olarak bulunurlar. (Aran ve Temel, 2004).

Martensitik Paslanmaz Çeliklerin Özellikleri:

- Manyetiktir.
- Orta seviyede korozyona karşı dayanımı gösterir.
- Kaynaklanabilirlikte düşük kabiliyettedir.
- Sertlik ve dayanımı ısıtılma işlem uygulandığında artmaktadır.

2.1.2.3 Östenitik paslanmaz çelikler

Östenitik çelikler, %18 krom ve %8 nikelden oluşmaktadır. Bu çeliklerin kolay şekillendirilebilme özelliğinin yanında, süneklik, korozyon ve mekanik dayanımı yüksektir. Manyetiklik özelliği olmayan östenitik çeliklere, sertleştirme işlemi yapılamamaktadır. Dayanım özelliği soğuk şekillendirme ile artırılmaktadır. Östenitik paslanmaz çeliklerin dünyadaki paslanmaz çelik üretimi içerisindeki payı %70 civarındadır. Bu yüzden içerisinde en çok tercih edilenler 304 ve 304L tipi paslanmaz çeliklerdir (Aran ve Temel, 2004).

Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Özellikleri:

- Korozyona dayanımı çok iyidir.
- Kaynaklanabilirlik oranı yüksektir.
- Sünektir, dolayısıyla şekillendirilmeleri kolaydır.
- Bakım ve temizlikleri kolaydır.
- Düşük ve yüksek sıcaklıklarda dahi iyi mekanik özelliğe sahiptir.
- Manyetiklik özelliği bulunmamaktadır.
- Dayanımlarının artırılması sadece pekleşme ile sağlanmaktadır.

2.1.2.4 Ferritik - Östenitik (dubleks) paslanmaz çelikler

Ferrit ve östenit fazlarından oluşan dubleks paslanmaz çelikler, %4,5- 8 Nikel ve %18 - 28 Krom içermektedir. Dubleks paslanmaz çelikler genelde %2,5 ila %4 arası

Molibden içerir. Bu sayede süneklik ve iyi seviyelerde mukavemet oluşturmaktadır. İlaveten korozyonlu ortamda dahi yorulma özelliği iyi seviyelerdedir. Uygun kaynak yöntemi uygulandığında kaynaklanabilirlik oranı yüksektir (Aran ve Temel, 2004).

Dubleks Paslanmaz Çeliklerin Özellikleri:

- Korozyona karşı yüksek dayanım gösterir.
- Korozif özelliği klor iyonları yok ise oldukça yüksektir.
- Mekanik dayanıklılıkları ferritik ve östenitik çeliklere göre daha yüksektir.
- Kaynak edilebilirlik ve şekil alabilirlik özellikleri oldukça iyidir.

2.1.2.5 Çökelme ile sertleşen paslanmaz çelikler

Çökelme ile sertleşen paslanmaz çeliklerin bileşenleri, Bakır, Niyobyum, Tantalyum veya Alüminyum elementleri barındırmaları dışında östenitik paslanmaz çelikler ile çok benzeşmektedir. Birçok paslanmaz çeliğe göre üstün mekanik özellikler gösterir.

Çökelme ile sertleşen paslanmaz çelikler, gerilme korozyon direncinin yüksek olması sebebiyle korozyona ve gerilmeye maruz alanlarda tercih edilebilmektedir.

2.1.3 Alaşım Elementlerinin Çeliğin Yapısına Etkileri

Çelik, demir (Fe) ile karbon (C) alaşımından oluşmaktadır. Alaşımlama, çeliklerde kimyasal bileşimin değiştirilmesi ve karbon çeliğinin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan bir yöntemdir. Farklı türden alaşım elementlerinin çeliğin özellikleri üzerinde etkileri bulunmaktadır. Alaşımlamada kullanılan elementlerin çeliğe kazandırmış olduğu özellikler aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Sertlik ve dayanım kazandırma,
- Korozif dayanım kazandırma,
- Sertleştirmeyi kolaylaştırma,
- Mıknatıslanma özelliği sağlama,
- Yüksek sıcaklıklara karşı dayanım kazandırma,
- Elektriklenme direnci kazandırma,

- Aşınmalara karşı direnç kazandırma,
- Isı altında genleşmeye karşı dayanım kazandırma.

2.1.4 Uygulama Alanlarına Göre Çelikler

Çelikler, %0,02 ila %2 arasında karbon ihtiva ederler. Çelikler barındırdıkları karbon miktarına göre üç farklı türden oluşurlar. İçerisindeki karbon miktarı %0,25'e kadar olanlar düşük karbonlu çelikler, %0,25 – 0,55 arasındakiler orta karbonlu çelikler ve %0,55 ile %2 arasında olanlar ise yüksek karbonlu çelikler olarak kategorize edilirler. Bünyesinde %0,8 karbon ihtiva eden çelikler ötektoid çelikler olarak isimlendirilirken bu çelikler östenit sıcaklığından ötektoid sıcaklığın altına soğutulması ile ferrit ve sementitten oluşan perlitik bir yapıya sahip olurlar. Çelik; %0,8'den daha az karbon içermesi durumunda ötektoid altı çelik, %0,8'den fazla karbon içermesi durumunda ise ötektoid üstü çelik olarak isimlendirilir (Ekinci, 2011; Höke, 2014).

Çeliklerin, endüstriyel alanda kullanım oranını artırmak için değişik gruplara ayrılmış olmaları, çeliklerin hangi alanda ve ne için kullanılacağı konusunda basitlik sağlamaktadır. (İpek, 1999).

Çelikler; üretim metotları ve kullanım alanlarına göre ise aşağıdaki gibi gruplandırılmışlardır.

- i. İmalat Çelikleri
- ii. Otomat Çelikleri
- iii. Yay Çelikleri
- iv. Takım Çelikleri
- v. Sementasyon Çelikleri
- vi. Islah Çelikleri
- vii. Paslanmaz Çelikler

2.1.5 AISI 304L Paslanmaz Çelikler

AISI 304L paslanmaz çeliğin AISI 304 çelikten farkı, karbon miktarının %0,03'ten düşük olmasından kaynaklanır. 304L paslanmaz çelikler karbürlemeyi ortadan

kaldırdığı için tercih sebebidir. 304L paslanmaz çeliklerin karbon miktarının az olması, malzemelerin işlenmesi esnasında oluşan yüksek sıcaklığın meydana getirdiği olumsuzlukları azaltarak, karbürlemeyi en aza düşürür. AISI 304L paslanmaz çeliklerin az miktarda karbon ihtiva etmesinin iyi yönlerinden biri de kaynaklanabilirliğinin diğer çelik türlerine göre daha iyi olmasıdır. AISI 304L paslanmaz çelikler, karbon karbürlemesinden mekanik özelliklere kısa sürede etki etmez, ancak kaynak esnasındaki ısı sebebiyle korozyona karşı direnci düştüğü için uzun sürede de olsa bu malzemelerde korozyon oluşabilmektedir. Bu durumu önlemek için “düşük karbon” (low carbon) yani "L" ile ifade edilen paslanmaz çelikler ön plana çıkar. AISI 304L tipi paslanmaz çeliklerin krom-karbür fazlarının mevcut olmayışı nedeniyle AISI 304 tipi paslanmaz çeliklere göre işlenebilirliği daha kolaydır. (Anonim, 304L Paslanmaz Çelik, <https://bircelik.com/tr/kategori/304l-1-4307>, Erişim Tarihi: 25.06.2018). AISI 304L paslanmaz çelik kimyasal özellikleri Tablo 2.1’de, mekanik özellikleri ise Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1 AISI 304L paslanmaz çelik kimyasal özellikleri (Osmanoğlu, 2012)

Element	C (maks)	Mn (maks)	P (maks)	S maks)	Si (maks)	Cr	Ni
%	0,03	2,0	0,045	0,03	0,75	18-20	8-10

Tablo 2.2 AISI 304L paslanmaz çelik mekanik özellikleri (Osmanoğlu, 2012)

Mekanik Özellikler	Değerler
Çekme mukavemeti (MPa)	500-700
Akma mukavemeti (MPa)	≥ 190
Sertlik (Brinell – HB)	≤215

AISI 304L paslanmaz çelikler, en temel paslanmaz çelik türlerinden olup, oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir AISI 304 tipi paslanmaz çelik östenitik paslanmaz çelik sınıfına girmektedir. Fiyatına göre iyi korozyon direnci, mekanik özellik ve kaynak kabiliyeti verdiğinden ötürü sıklıkla tercih edilmektedir. AISI 304L tipi paslanmaz çelikler yaygın olarak kimya, petrokimya, ev aletleri ve gıda sanayisi gibi sektörlerde kullanılmaktadır (Osmanoğlu, 2012).

3. ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

Isıl işlem ile tavlama ve soğutmaya tabi tutulan çeliklerde, kullanım amacına uygun bir mikroyapı oluşturarak istenen fiziksel ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sağlanabilmektedir (MKE Yayınları, 1978).

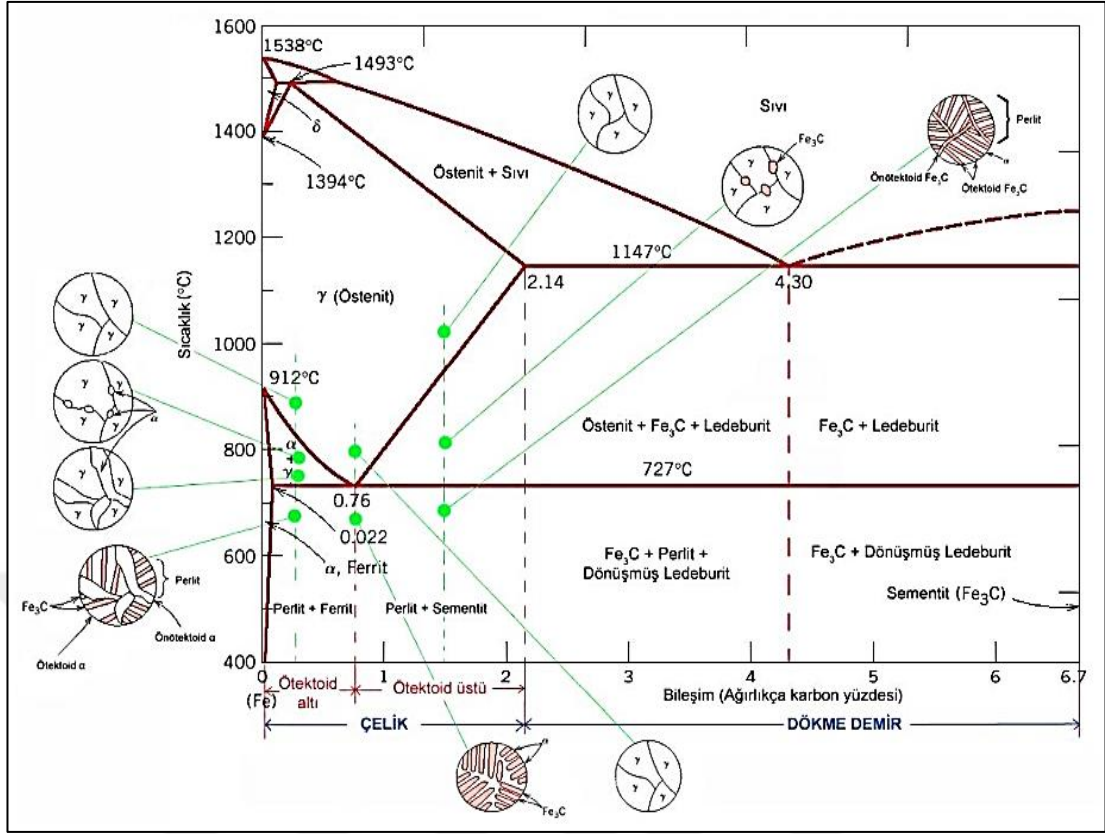
Isıl işlemle ilgili parametreler aşağıdaki gibidir. (Anonim, 1990; Demirci, 2004).

- a) t: Sıcaklıkta tutma süresi (h)
- b) p: Basınç (Pa)
- c) T: Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
- d) V_s : Soğutma hızı ($^{\circ}\text{C/s}$)

Çeliklerde ısıtıl işlemin belirlenmesinde seçilen özellikler:

- a) Isıl işlem sonrası istenilen mekanik özellikler,
- b) Çeliğin kullanım amacı,
- c) Çeliğin karbon oranı,
- d) Çelikteki alaşım elementlerinin yüzdesel oranı,
- e) Isıl işlem öncesi çeliğin mekanik özellikleri,
- f) Kullanılacağı yerde maruz kalacağı zorlamalar.

Malzemelerin içeriğindeki karbon miktarı dönüşüm için tercih edilen ısıtıl işlemdeki sıcaklığa göre değişir. Ancak dönüşümlerde belirlenen sıcaklık miktarları, ısıtıl işlem öncesinde tam olarak bilinmemektedir. Dönüşüm sıcaklıklarını belirlemede demir-karbon denge diyagramındaki (Şekil 3.1) eğrilerden faydalanılır (Weissbach, 2000).



Şekil 3.1 Demir - Karbon Denge Diyagramı (Ay ve Kapusuz, 2008)

Çelik malzemelere uygulanan yaygın ısıtma yöntemleri aşağıdaki şekilde sıralanmıştır (Çakır, 1982).

3.1 Tavlama

Çeliklerin iç gerginliklerini, sıcak ve soğuk işleme sonrasında oluşan imalat bozukluklarını, sertleştirme işleminden sonra oluşan çarpılmaları, sert dokuda olanların kolay işlenebilmesi için yumuşatılması gibi özellikleri sağlayabilmek için belirli bir özellikte uygulanan ısıtma soğutma işlemine “**tavlama**” denir.

3.1.1 Yumuşatma Tavlama

Çeliğin, ulaşabileceği en yüksek yumuşaklığa erdirmek için uygulanır. Çelik türlerinde soğuk biçimlendirmeyi, orta ve yüksek karbonlu çeliklerde ise talaş kaldırma kolaylığı sağlamak için yumuşatma tavlama uygulanır.

3.1.2 Gerilim Giderme Tavlaması

Sertleştirme sırasında oluşan martenzit imalat birçok uygulama için fazlasıyla sert ve gevrek olup darbe direnci ve işlenebilirliği çok düşüktür. Hızlı soğuma sonucu, su verme işleminden sonra parçada yüksek gerilimler oluşur. Bu sebeple, hem parçanın gevrekliğini gidererek tok bir malzeme elde etmek, hem de iç gerilimleri azaltmak amacıyla menevişleme denilen ısıtma işlemi uygulanır. Islah etme daha çok imalat çeliklerine uygulanan önce bir sertleştirme, arkasından da yüksek sıcaklıkta menevişleme (450-650 C°) işlemlerinin bütünüdür. İşlemin amacı yüksek sünekliktir. Menevişleme ile arasındaki fark, işlemlerin yapıldığı sıcaklıktır.

3.1.3 Kristalleştirme Tavlaması

Soğuk şekil verme sonucunda sertleşen malzemenin özelliklerini (örneğin yüksek dayanım, düşük süneklik ve tokluk gibi) başlangıç durumuna getirmek amacıyla yapılır. Tavlama sıcaklığı 600-700°C’ olmakla birlikte, yaklaşık bir saatlik sürede gerçekleşir. Bu tavlamanın uygulanabilmesi için malzemenin en az %10 oranında soğuk şekillendirilmiş olması gerekir. Böylece metalik malzemenin, katı halde bozulmadan yeniden kristalleşmesi sağlanır. Ardından soğuk şekillendirme sonucunda oluşan sertleşme, giderilerek malzemeye daha sonraki soğuk şekillendirme işlemleri için gerekli olan süneklik kazandırılır.

3.1.4 Normalleştirme Tavlaması

Normalleştirme tavlama, orta ve düşük karbonlu çeliklere çeşitli biçimlendirme işlemlerinden sonra, imalat bozukluklarını düzenlemek ve çekme dayanımını artırmak için yapılır.

3.2 Sertleştirme

Kristal imalatlarının kaymaya karşı gösterdiği direnç, beraberinde sertlik denilen yapıyı getirir. Sertleştirme, çeliklerin daha önceden belirlenmiş sertleştirme sıcaklıklarına kadar tavlama, ardından soğutulması ve son olarak da sert dokunun istenilen düzeyde sünek hâle getirilmesidir.

3.2.1 Suda Sertleştirme

Austenit dokusu (GSK eğrisinin üstü) 1000 – 1200°C sıcaklık bölgesine kadar ısıtılan çelik parça, bozulmaya zaman bulamayacak şekilde hızla soğutularak çeliğin sertleştirme işlemi yapılır. Parçanın tamamı suyun içine girecek şekilde hemen su tankına sokulur. Suyun serin kısımlarından daha fazla yararlanmak için çelik parça su tankı içinde sekiz çizdirilerek gezdirilir ve sertleştirme işlemi gerçekleştirilir.

3.2.2 Yağda Sertleştirme

Alevlenme sıcaklığı çok yüksek olan madeni yağlar kullanılır. Yağın sudan farkı daha yavaş soğutmasıdır. Bu durum bazı çeliklerin dokusuna daha uygundur (düşük alaşımlı çelikler gibi). Çeliğin yavaş soğutulması, iç gerilmelerin yani çarpılmanın az olmasını sağlar.

3.2.3 Havada Sertleştirme

Yüksek alaşımlı çelikler havada yavaş soğutularak sertleştirilir. Havada sertleştirilen çelikler merkez çekirdeğine kadar aynı derecede sertleşir. Bu özelliğinden dolayı bilhassa kesici takımlar havada sertleştirilir.

3.3 Yüzey Sertleştirme

Yüzeyde sert ve aşınmaya dayanıklı, iç dokuda ise yumuşak ve tok özelliklerin istendiği, değişken ve darbeli zorlanmalara karşı dayanıklı parçalar elde etmek için uygulanan ısıtma işlemlerdir. Genellikle karbon oranı çok az olan çeliklere uygulanır. Örneğin, dişli çarklar, rulmanlı yataklar, miller ve pistonlar gibi birçok bitmiş iş parçası bu işlemlere tabi tutulur.

3.3.1 Sementasyon

Genelde düşük karbonlu çelikler için kullanılmakla birlikte, akma sınırlarının yüksekliği sebebiyle kolaylıkla şekillendirilebilirler. Bunlar sünek fakat sertleştirilemez karakterdedir.

Sementasyon işlemi iki aşamada yapılır:

1. Karbürizasyon (yüzeye difüzyon yoluyla karbon emdirme),
2. Sertleştirme işlemi,

Sementasyon yüzeyin dokusunu değiştirmede kullanılan maddenin cinsine göre adlandırılır:

1. Katı sementasyon,
2. Sıvı sementasyon,
3. Gaz sementasyonu

3.3.2 İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme

Yüksek frekans üretebilen, devreden alınan alternatif akım yük sargısından geçer ve ısıtılacak parçanın yüzeyinde, endüksiyon akımı meydana getirir. Endüksiyon akımını ileten ekipmanın, ısıtılacak yüzeyi sıkıca sarması, ısıtma işleminin sağlıklı olmasının ilk şartıdır.

Uygulanan frekanslar 10 ile 10000 kHz değerleri arasındadır. İş parçasının bu akımın geçmesine karşı gösterdiği direnç, parçanın ısınmasına sebep olur. Isıtma derinliğinin tayini, kullanılan frekans ile enerji miktarı ve enerji verilmesi sırasında geçen süreye bağlıdır.

İçerisinde %0,35 ile 0,60 oranında karbon bulunan, orta karbonlu çelikler, bu yöntemle yüzey sertleştirmeye tabi tutulur.

3.3.3 Nitrasyon

Nitrasyon işlemi yüzey sertleştirme işlemleri içerisinde üstün özelliklere sahip olan ve en sık kullanılan yöntemlerden biridir. İlk kez 1920’li senelerde uygulanmaya başlanan nitrasyon işlemi, malzemenin yüzey kısmına azot atomlarının difüze edilmesiyle yüzeyin sertleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Nitrasyon, 480 ila 570°C arasındaki sıcaklıklarda uygulandığından malzemenin yapısal olarak faz dönüşümüne

sebebiyet vermemektedir. İçyapı içerisine azot atomları difüzyon olmak suretiyle metal - nitrür bileşeni barındıran sert bir yüzey meydana gelir (C. Hojerslev, 2001). Nitrasyon işlemlerinin yapıldığı örnek ısıtım fırınları Şekil 3.2’de görölmektedir.

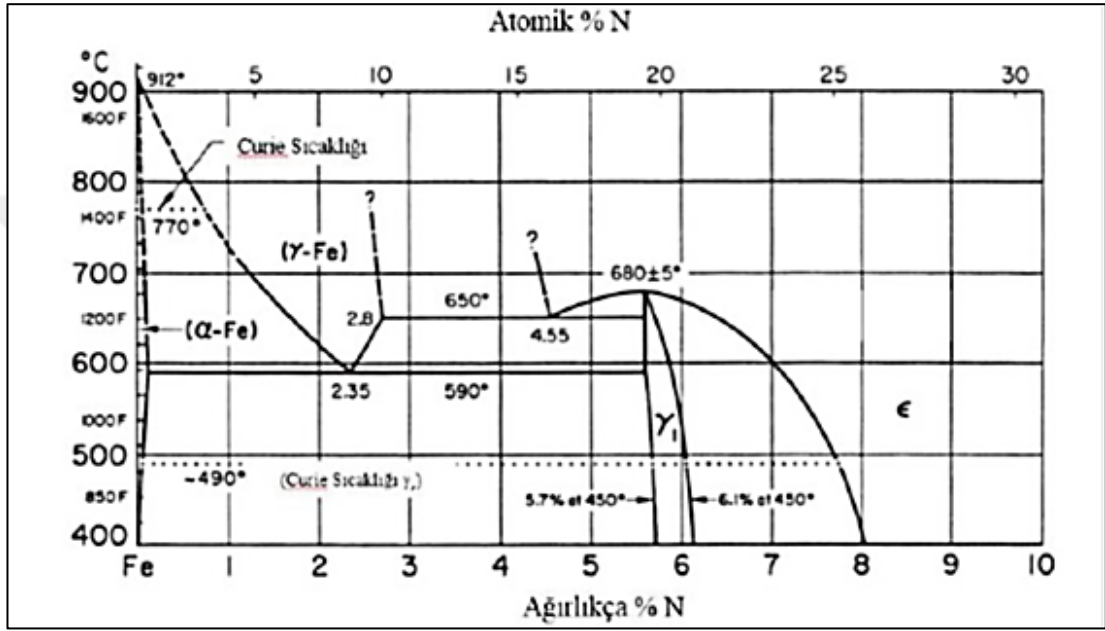


Şekil 3.2 Isıtım işlemleri fırınları [https://korkmazmetal.com.tr/isil-islem-firinlari]

Sementasyon işlemine göre bir takım üstünlüklerinin olması, nitrasyon işleminin daha yaygın olarak kullanılması sonucunu doğurmuştur. Nitrasyon işleminin sementasyon işlemine göre en önemli üstünlüğü çelik malzemelere daha fazla uygulanabilir olmasıdır. Nitrürlenebilir olma yeteneği, çeliklerin cinsine göre değişmekte olup, çeliğin azot atomunu absorbe etme yeteneği ve malzemenin alaşım element miktarı ile bağlantılı olarak yüzeydeki özelliklerin değiştirilebilmesi olarak da tanımlanabilmektedir (Pye, 2003).

Nitrasyon işlemi faz değişim sıcaklığının altında uygulandığından ferritten östenite ya da östenitten martenzite herhangi bir faz değişimi meydana gelmez. Böylelikle boyutsal kararlılık da sağlanmış olur. Malzemenin yüzey kısmında ince bir nitrasyon tabakası meydana geldiğinden ve azot atomları çeliğin yapısını difüze ettiği için az miktarda hacimsel değişim meydana gelebilmektedir (Pye, 2003).

Demirin içerisindeki azotun çözünürlüğü sıcaklık ile bağıntılıdır. 450°C (840°F) sıcaklık derecesinin üstünde ϵ fazı meydana gelir. Karbonun miktarı arttıkça bu fazın meydana gelme potansiyelinde de artma meydana gelmektedir. 490°C (914°F) sıcaklık derecesine ulaşıldığında ise γ' fazı meydana gelir. Bu aşamanın ardından 680°C (1256°F) sıcaklık derecesine kadar çözünürlük düşmeye başlar. Fe-N ikili faz diyagramı ve nitrasyon fazları Şekil 3.3'te gösterilmiştir (Pye, 2003).



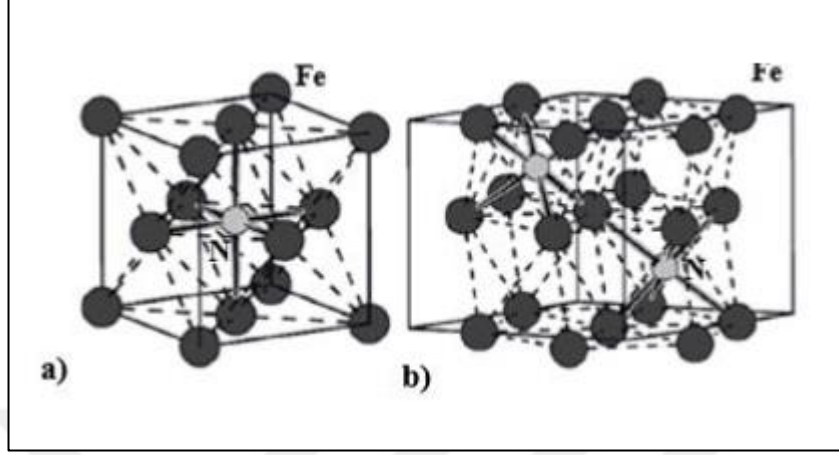
Şekil 3.3 Fe-N ikili faz diyagramı (Pye, 2003)

Nitrasyon işleminde istenen sonucun elde edilmesi için proses parametrelerinin yakın kontrolü oldukça önemlidir. Gaz nitrasyon prosesinde, kontrol altında tutulması gereken başlıca parametreler aşağıda belirtilmiştir:

- Fırın sıcaklığı,
- Süre,
- Gaz akışı,
- Gaz aktivasyon kontrolü,
- Fırın haznesi bakımı.

Nitrasyon işleminden sonra malzemenin yüzey kısmında “beyaz renkli tabaka” olarak da isimlendirilen “alaşımlama tabakası” ve sonrasında ise “difüzyon tabakası” meydana gelmektedir. Beyaz tabaka hegzagonal sıkı paket yapıdaki ϵ -Fe₃N ile yüzey

merkezli kübik yapıdaki γ' -Fe₄N fazlarını içermektedir (Du, vd., 2000). Şekil 3.4'te bu fazların kristal yapıları görülmektedir.



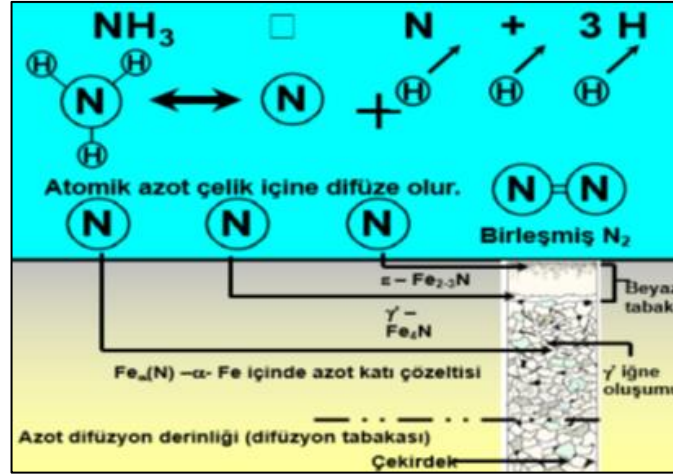
Şekil 3.4 (a) γ' -Fe₄N ve (b) ϵ -Fe₃N fazlarının kristal yapısı (Du, vd., 2000)

Beyaz tabaka, çok sert ve kırılgan bir yapıda olduğu için malzemede aşınmaya ve korozyona karşı direnç kazandırmaktadır. Difüzyon tabakası ise malzemeye yorulma dayanımı kazandırmaktadır (Stott ve Jordan, 2001). Şekil 3.5'te nitrasyon prosesi şeması gösterilmiştir.

Nitrasyon işleminde uygulanan yöntemler:

- Tuz nitrasyon,
- Akışkan yatak gaz nitrasyon,
- Vakum gaz nitrasyon,
- Plazma gaz nitrasyon.

Her bir yöntem avantaj ve dezavantajlar barındırmaktadır. Akışkan yatak gaz nitrasyon prosesinde sağlanmış olan ısıyı iyi transfer etme özelliği, vakum gaz nitrasyon prosesinde daha da iyileşme sağlayarak, malzemede daha dar aralıkta ısı farklarının meydana gelmesi sağlanmış olur. Bunlarla birlikte vakum gaz nitrasyon prosesi ise en uzun zaman alan prosestir. Plazma nitrürleme işlemi ise en hızlı netice alınan prosestir (Lampman, 1995).



Şekil 3.5 Nitrasyon prosesi şematik gösterimi (Lampman, 1995)

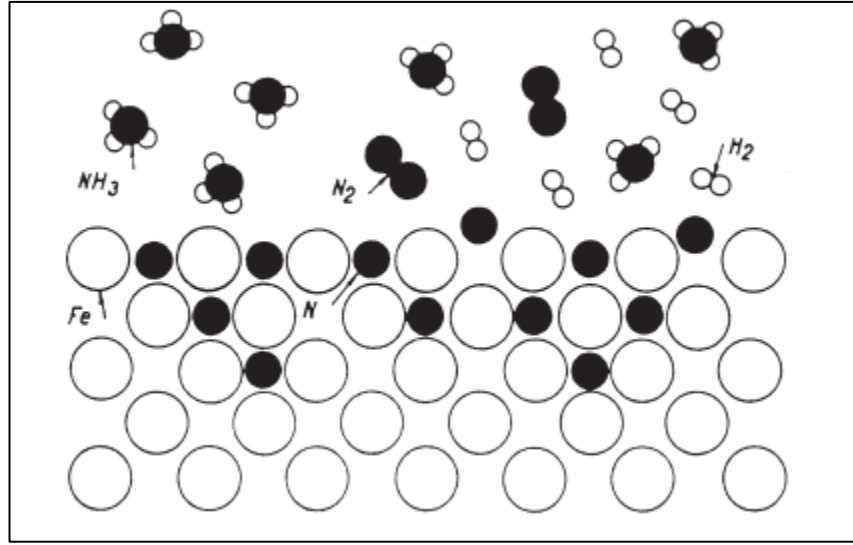
Gaz nitrasyonu prosesinde genellikle amonyak (NH_3) gazı tercih edilir. Sıcaklık derecesi $500\text{-}570^\circ\text{C}$ ($930\text{-}1060^\circ\text{F}$) derecelere yükseldiğinde amonyağın kararsız yapıya gelmesiyle hidrojen ve azot atomlarından oluşan ayrışma meydana gelir.



Azot atomlarının çeliğin yüzey kısmına difüze olmasıyla $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$ ve $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$ fazları meydana gelir. Hidrojen atomları da fırının atmosfer ortamına salınmış olur. Bu işlemlere ait şema Şekil 3.5'te görülmektedir.

Şekil 3.6'da gösterilen $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$ ve $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$ fazlarının oluşturduğu yapı kırılıgandır. Bu yapı "beyaz tabaka" olarak adlandırılır. Çeliğin yüzey kısmında yapının beyaz tabaka oluşumundan sonra amonyak ayrışma işleminin yavaşlayarak, yüzey kısmında gaz baloncuklarının meydana gelmesi nedeniyle beyaz tabaka poroziteleri görülmektedir (Bell, 1997).

Gaz nitrasyonu prosesi esnasında öncelikle malzemenin ısıtılarak iç gerilimlerden uzaklaştırılması sağlanır. Sonrasında nitrasyon sıcaklığı seviyesine çıkartılarak nitrasyon işlemi sağlanmış olur. Sonrasında malzemenin oda sıcaklığında soğutulması sağlanır. Genelde östenitleme sıcaklığının altında olduğundan faz dönüşümüne rastlanmaz (Clauss, vd., 2009).



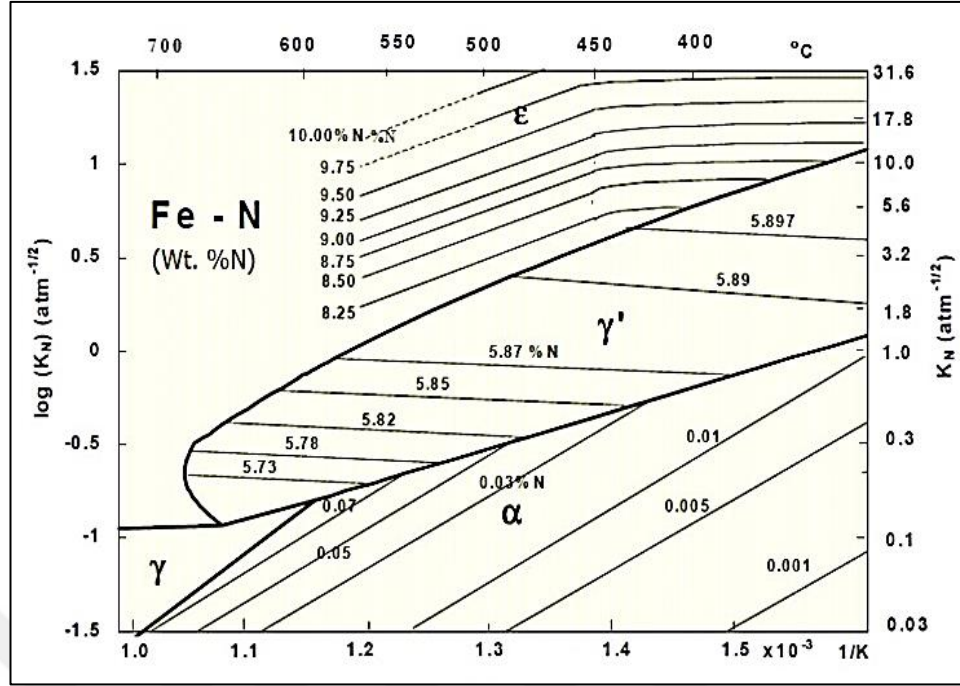
Şekil 3.6 Gaz nitrasyonunun şematik gösterimi (Clauss, vd., 2009)

Sıcaklık sabitken çözünen azot atomlarının aktivasyonunun kontrol edildiği orana “Nitrasyon potansiyeli” (K_n) denmektedir. Nitrasyonun etkisi K_n değeriyle ölçülmekte ve kontrol edilmektedir.

$$K_n = \frac{p_{NH_3}}{p_{H_2}^{3/2}} \dots\dots\dots (3.2)$$

Bazen de beyaz tabaka olarak isimlendirilen alaşım tabakası oluşumunun istenmediği durumlar olur. Bu alaşım tabakasını kontrol etmek için Dr. Carl Floe tarafından keşfedilen “Floe Metodu” kullanılmaktadır. Bu metoda, iki aşamalı işlem de denmektedir. Bu prosesle, nitrasyon potansiyeli (K_n) ikinci aşama işleminde düşürülmektedir. Uygulama ile 495°C sıcaklık derecesinde yaklaşık olarak %30 amonyak ayrışma yüzdesi yakalanarak sıcaklık 565°C’ye çıkartılmaktadır. Bu sıcaklıkta yaklaşık olarak %75 ila %80 aralığında ayrışma sağlanabilmektedir (Akbari, vd., 2010).

Nitrasyon faz kontrolleri “Lehrer Diyagramı” ile yapılabilir. Lehrer Diyagramıyla sıcaklığa ve nitrasyonun potansiyeline bağlı olarak meydana gelebilecek Fe-N faz bölgelerinin tespiti yapılabilir. İlaveten demirin yüzey kısmındaki azotun konsantrasyon durumu da görülebilir. Şekil 3.7’de Lehrer diyagramı görülmektedir (Akhtar, vd., 2010).



Şekil 3.7 Lehrer diyagramı (Akhtar, vd., 2010)

Nitrasyonun sağlamış olduğu üstünlükler genel olarak aşağıda belirtilmiştir:

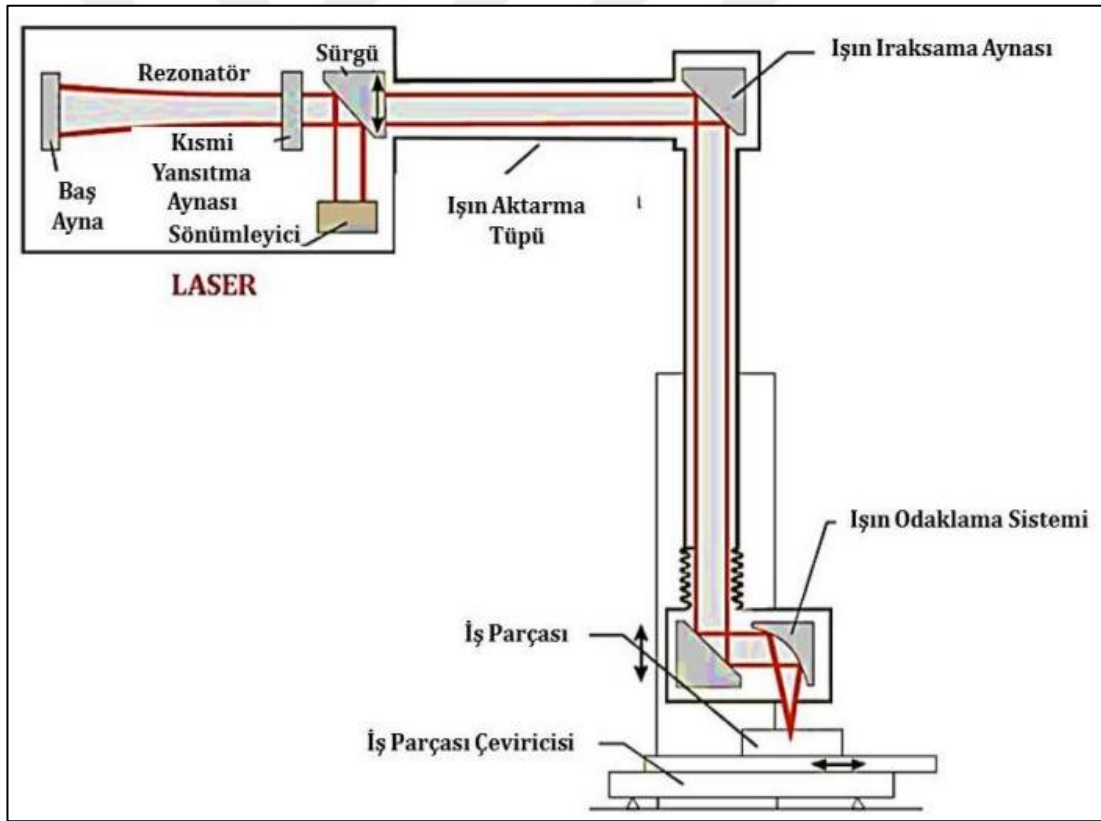
- Yüzey sertliği,
- Aşınma direnci,
- Yorulma dayanımı,
- Korozyon direnci,
- Boyutsal kararlılık (Thelning, 1975).

4. LAZER KAYNAĞI

4.1 Lazer Kaynağı ve Özellikleri

4.1.1 Lazer Kaynağı

Lazer kaynak yöntemi, atom fotonlarının salınış biçimini yönetme prensibiyle çalışan bir kaynak çeşididir. Lazer, İngilizce kelimelerden oluşan "Light Amplification By Stimulated Emission Of Radiation"(radyasyon yayınının uyarılmasıyla ışığın güçlendirilmesi) kelimelerinin baş harfleri kullanılarak kısaltma yapılmış bir kelimedir. (Beersiek, 1999). Şekil 4.1’de lazer kaynağının şeması bulunmaktadır.



Şekil 4.1 Lazer kaynak yönteminin şematik gösterimi (Blackburn, 2012)

Lazer kaynağının, geleneksel kaynak yöntemlerine kıyasla malzemelere enerji nakil şekli daha değişiktir. Üretilen lazer ışını, yönlendirme aynalarından yansarak odaklama mekanizması tarafına gelir. Küçük bir alana odaklanmış lazer ışını yoğunlaştırıldığı malzeme üzerinde ergime ve buharlaşma oluşturur. Lazer, malzeme

içine nüfuz ederken buharlaşma sonucu koruyucu gaz içeren plazma yoğunlaşmaktadır. Plazma içinde oluşan ısı, eriyen malzemeye nüfuz ederek iş parçası üzerinde iletim sağlanır. Eriyik durumda olan malzemenin sıcaklık ve basınç farkı ile yer değişimleri oluşur, böylelikle akıcı durumda buhar kanalı (anahtar deliği) meydana gelir. Sonrasında, iş parçası ya da ışın demeti sabit bir hızla iş parçası üzerinde hareket ettirilmek suretiyle kaynak yapılır. Lazer ışını hareket ettirildiği yöne göre metal parça erir, arkada kalan eriyik kısımlar ise katılaşmış olur. Katılaşmanın tamamlanmasıyla homojen yapıda dar bir kaynak dikişi meydana gelir. (Beersiek, 1999; Karaaslan, vd., 2001).

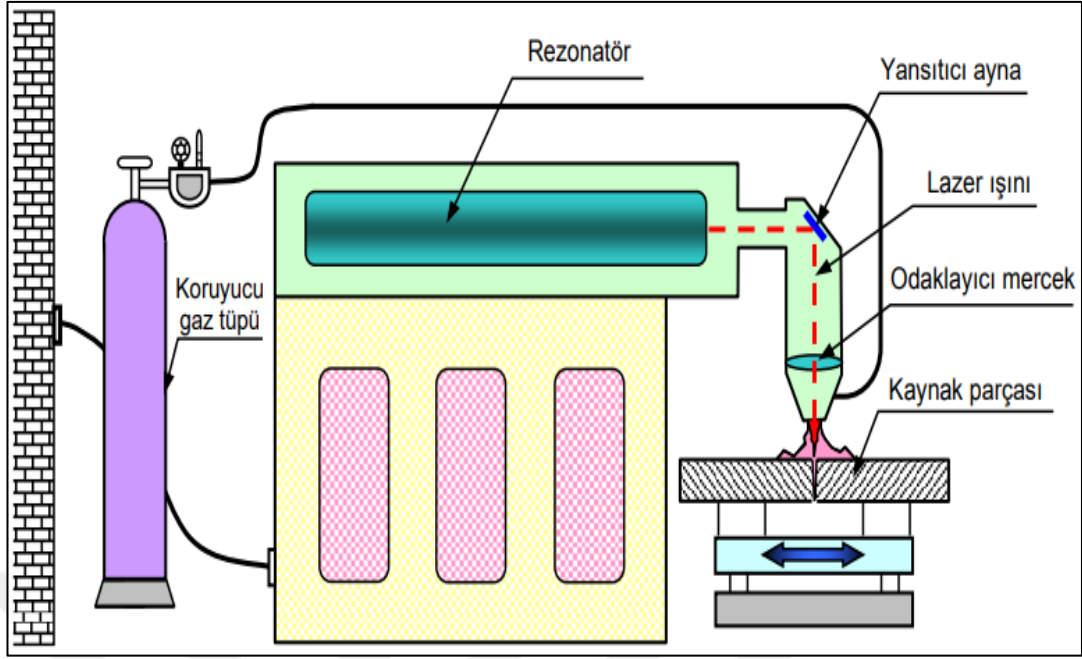
4.1.2 Lazer Kaynağının Tarifi ve Temel Elemanları

4.1.2.1 Lazer kaynağının tarifi

Lazer kaynağında malzemenin ışık enerjisi ısı enerjisiye dönüştürülür. Malzemenin yüzey kısmı ısıya maruz kalmasıyla erir ve yüzeydeki iletkenlik sayesinde erime ilerlemeye başlar. Kaynak esnasında, ışın enerjisindeki durum malzemenin buharlaşma sıcaklığından daha düşük olacak şekildedir. Kaynaktaki nüfuziyet malzemeye iletilen ısıya bağlı olmakla birlikte kaynak yapılacak malzemelerin kalınlıkları 2 mm ila 10 mm arasında değişmektedir. Isının tesiri altındaki bölgede (ITAB) erime ve sonrasında ise birleşme gerçekleşir. (Limmaneevichitr, 2002).

4.1.2.2 Lazer kaynak cihazlarının temel elemanları ve özellikleri

Lazer ışını optik bir rezonatör içinde ışık kaynağını ve aktif maddeyi barındırır. Aktif ortamdaki elemanlar, CO₂ gazı veya Erbiyum kristalinden oluşur. Aktif ortamdaki uç kısımlarda tam ve yarı yansıtma özelliği olan aynalar ve lazer ışınının çıktığı bölümde mercekler bulunmaktadır. Şekil 4.2’de lazer cihazının ekipmanları görülmektedir. (Özcan, 2003).



Şekil 4.2 Bir lazer kaynak makinesinin temel elemanları (Kahraman ve Gülenç, 2020)

Lazer kaynağına verilen isimler ışık kaynağında bulunan gazın, katı, sıvı ya da yarı iletken olma durumuna göre çeşitlenmektedir. Örnek olarak argon gazı bulunuyor ise “argon lazeri”, CO₂ gazı bulunuyor ise “CO₂ lazeri”, Helyum ve Neon bulunuyor ise “He-Ne lazeri” gibi isimler almaktadır. Aktif ortamın işlevi optiği yükseltmektir. Bir uçtan aktif ortama giren ışık demeti, bu ortamda fotonlar sayesinde ışık demeti yoğunluğunu yükselterek diğer uçtan çıkmaktadır. Böylelikle aktif ortam lazer ışını oluşmasında bu şekilde işlev sağlamaktadır. (Özcan, 2003).

4.1.3 Lazer Kaynak Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

4.1.3.1 Lazer kaynak yönteminin avantajları

- Lazer kaynağında, birçok kaynağa kıyasla nüfuziyet daha derin olmakla birlikte daha hızlı kaynak işlemi yapılmaktadır. Kaynak işlemi sonrası deformasyona rastlanmaz. (Pakdil, vd., 2005).
- Lazer kaynağı, farklı kaynak yöntemleriyle birlikte (hibrit) kullanılmaya elverişlidir. (Yavuz ve Çam, 2005).
- Lazer kaynağının, klasik kaynaklara göre kaynak çapı oldukça küçüktür. Bu özelliğiyle ince parçalara birleştirme ve kesme işlemi yapılmak üzere tercih edilmektedir. (Püskülcü ve Koçlular, 2009).

- Lazer kaynağıyla birleştirme işlemleri yüksek hızda yapılabilir
- Otomasyon sistemlerine elverişlidir ve üretimde kullanımı uygundur.
- Kaynak sonrasında taşlama gibi ekstra bir işlem gerektirmez ve dar kaynak dikişlerine sahiptir.
- Birbirinden farklı malzemelere kaynaklı birleştirme işlemi yapılması mümkündür.
- Klasik kaynak yöntemleriyle ulaşılması güç bölgelerin kaynak işlemi yapılabilir. (Tokdemir, vd., 2010).
- Klasik kaynak yöntemlerine kıyasla aşınmalara karşı daha mukavemetlidir.
- ITAB'ın dar olmasından dolayı metalürjik hasar olma olasılığı lazer kaynağında çok daha düşüktür.
- Çok daha küçük ve ince malzemelere kaynaklı birleştirme işlemi yapılabilir.
- Dar bölgelerde ve özel koşullarda dahi kaynak yapılabilir.
- Isıya duyarlı parçalara da çok yakından kaynak işlemi uygulanabilir.

4.1.3.2 Lazer kaynak yönteminin dezavantajları

- Kaynaklanacak parçalar birbirlerine paralel olmaması ve yüzeyin düz olmaması durumunda kaynak hataları ortaya çıkabilmektedir.
- Derinliği fazla olan malzemelerde nüfuz etme durumu güçtür.
- Kaynaklanacak malzemelerin yansıtma özelliği yüksek ise lazer kaynağının yapılması zorlaşmaktadır.
- Darbeli lazer ile kaynatılan sert malzemelerin kaynak bölgesinde, kırılmalıklar oluşabilmektedir.
- Yatırım maliyeti yüksektir.

4.1.4 Lazer Kaynağı Kesitinin Tipik Görünümü ve Oluşan Bölgeler

Lazer kaynak işleminde meydana gelen bölgeler aşağıda belirtilmiştir;

- Ergime Bölgesi (EB)
- Isı tesiri altındaki bölge (ITAB)
- Temel (esas - ana) malzeme (TM)

Kaynak ısısının temas ettiği bölgeler, “kaynak bölgesi” olarak adlandırılır. Bu bölgeler; ergime bölgesi ve ITAB olarak iki bölümden oluşmaktadır.

4.1.4.1 Ergime bölgesi (EB)

Ergime bölgesi, kaynak esnasında ısıнын etkisiyle ergiyen ve kaynak sonrasında katılaşıyan bölgedir.

4.1.4.2 Isı tesiri altındaki bölge (ITAB)

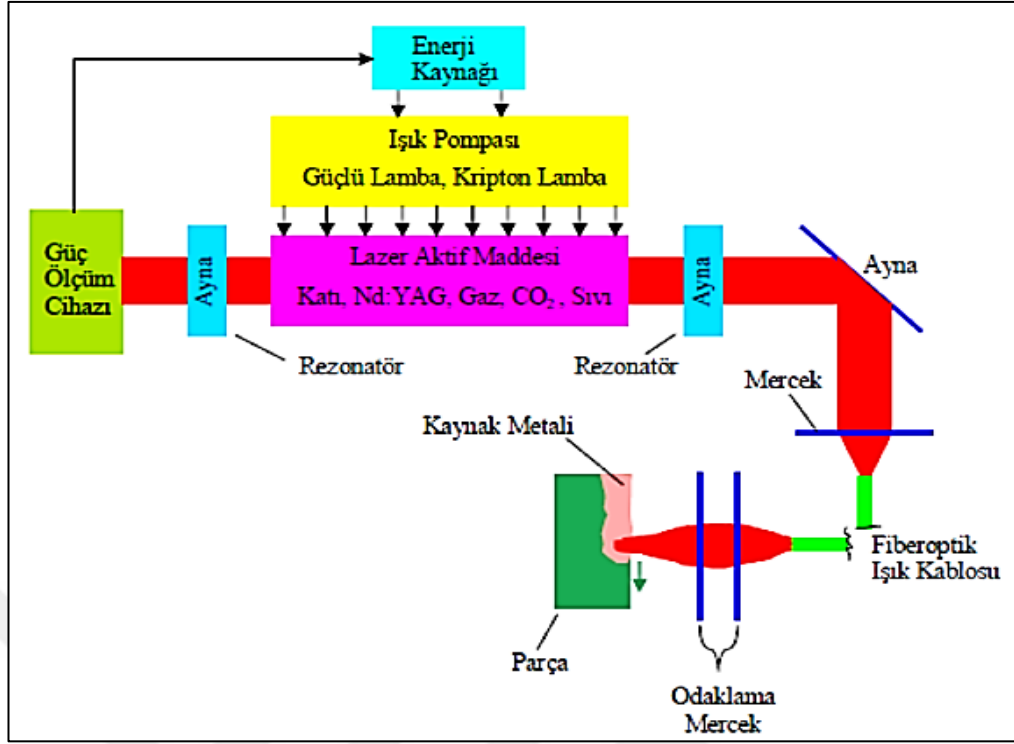
ITAB, kaynağın merkez kısmının yakınındadır ve kaynak esnasında oluşan ısıdan dolayı mikroyapı ve mekanik özelliklerde değişim meydana gelen bölgedir. ITAB plastik deformasyona maruz kalmamaktadır.

4.1.4.3 Temel malzeme (TM)

Kaynak bölgesine uzak olmasından dolayı, bu bölgede deformasyon oluşmaz. Ancak çok az miktarda ısıl etki görülebilir. Mikroyapıda veya mekanik özelliklerde herhangi bir değişim olmaz.

4.2 Lazer Kaynak Yöntemleri

Lazer ışınının ışık demeti meydana getirmesi, rezonatör aynalarla sağlanır. Işık demeti ayna ve mercekler yardımıyla ya da fiber optik kablolar vasıtasıyla odaklama sistemine intikal eder. Lazer ışını dalga boyutu iletiminde kullanılan yöntemle göre değişkenlik gösterir. Nd:YAG ve CO₂ lazer kaynak dalgalarının boyutu küçüktür. (Özden ve Gürsel, 2004). Lazer ışın cihazının şeması Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Lazer kaynak makinesinin gösterimi (Özden ve Gürsel, 2004)

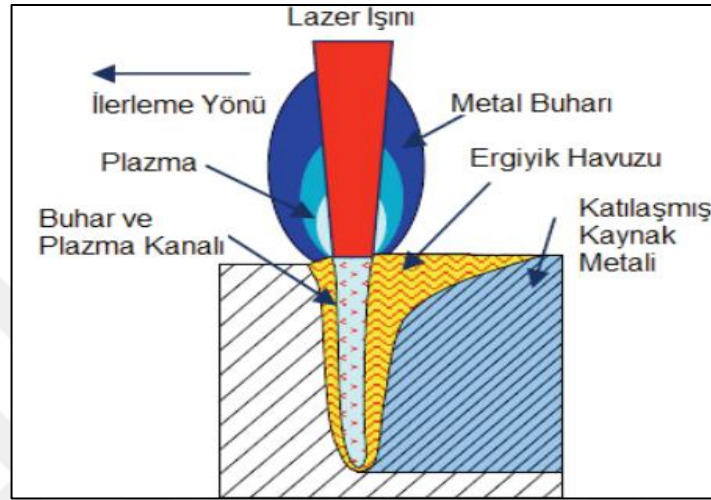
Lazer ışınının enerji yoğunluğu kaynağın yöntemini belirler. Kaynatılacak malzemede kalınlık az ise iletimle kaynak, kalınlık çok ise nüfuziyet kaynağı yöntemi kullanılmaktadır. (Duley, 1999).

Bu iki yöntemin en önemli farkı iletim kaynağında kaynaktaki banyo sürekli, nüfuziyet kaynağında ise lazer ışın demeti metal havuzundaki sıvıyı iki boşluğa böler. Bu boşluklar anahtar deliği gibi bir görüntüyü andırıldığından “anahtar deliği kaynağı” ismini almıştır. Nüfuziyet kaynağı yönteminde malzemenin kaynak bölgesinde gözenekli yapıların oluşmasını önlemek için koruyucu gazlar kullanılmaktadır. (Abbott ve Albright, 1994).

4.2.1 Derinlemesine Nüfuz Eden Lazer Kaynağı

- Anahtar deliğinin meydana gelmesi, lazer ışınının malzemeye odaklanması ile sağlanır. (Beersiek, 1999).
- Anahtar deliği olduğu bölgede ergiyik havuz oluşur. (Arata, 1987).
- Ergiyik malzeme, yer çekimi, yüzey gerilmesi ve gaz buhar basıncı etkisiyle kararlı yapıya sahiptir. (Lancaster, 1986).

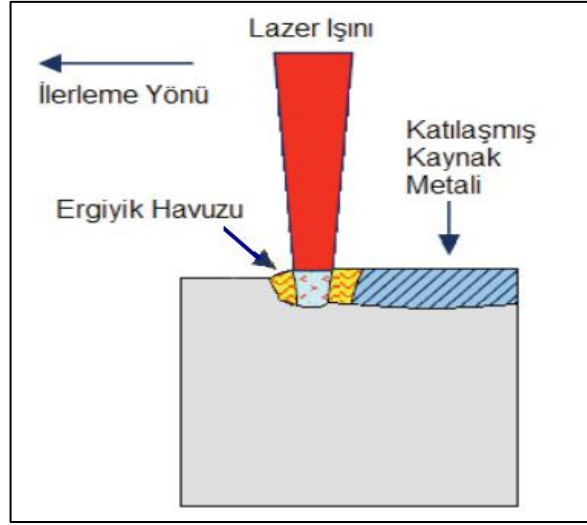
- Anahtar deliğinin eninin boyuna orantısı 1/10 oranındadır.
- Derinlemesine nüfuz eden lazer kaynağının ışın demetine ait güç değeri önem arz eder. Kaynağın hız miktarı ise malzemeyi eritecek büyüklükte, fakat çukur içindeki malzemeyi buharlaştırmayacak ölçüde olmalıdır. (Özcan, vd., 2004). Şekil 4.4'te derinlemesine nüfuz eden lazer kaynak uygulaması görülmektedir.



Şekil 4.4 Lazer kaynağında anahtar deliği ve plazma oluşumunun şematik kesit görünüşü.
(Özdemir Uğur, 2012)

4.2.2 İletimsel Lazer Kaynağı

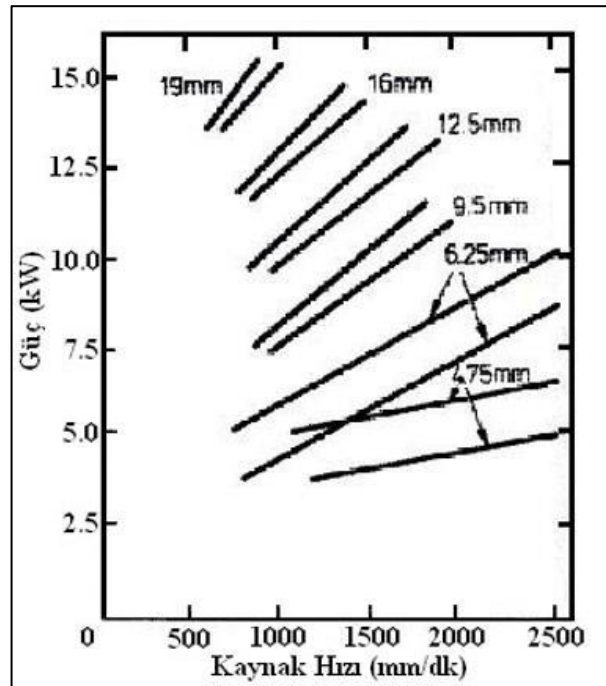
- İletimsel lazer kaynağı ile malzemelerin birleştirildiği bölgedeki sıcaklık kaynama sıcaklığına yaklaşmaktadır.
- Lazer gücünün malzemenin kaynama sıcaklığına ulaşmasının istenmediği, fakat eriyik hale gelmesinin istendiği durumlar için iletimsel lazer kaynağı tercih edilir.
- İletimsel lazer kaynağının en-boy oranı düşüktür.
- Güç miktarı yüksek tutulur ise kaynatma özelliği yerine özellikle ince malzemelerde kesme işlemine olanak sağlanır.
- İletimsel lazer kaynağının, 0,5 mm kalınlık altındaki malzemelerin birleştirilmesinde uygun bir yöntem olduğu bilinmektedir. (Noaker, 1993). Şekil 4.5'te iletimsel lazer kaynağı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.5 İletimsel lazer kaynağı uygulaması. (Özdemir Uğur, 2012)

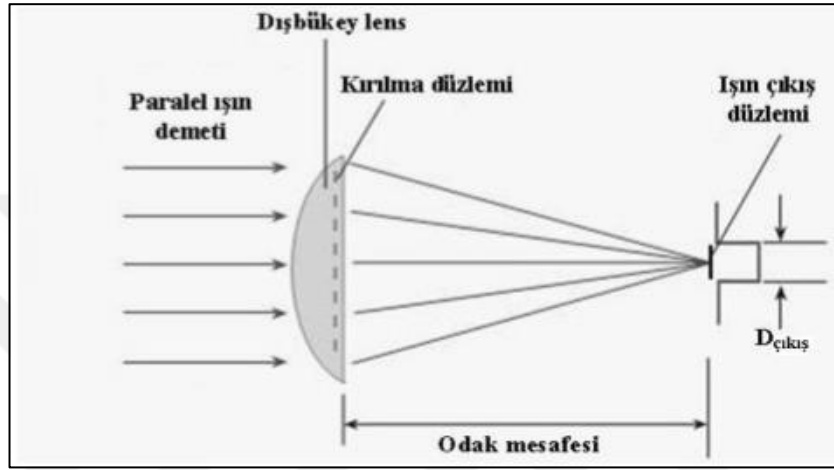
4.3 Lazer Kaynağında Temel Kaynak Parametreleri

Darbeli lazer kaynağında ve devamlı-sürekli lazer kaynağında önem seviyesi en yüksek olan parametre “güç” tür. Kaynaklanacak malzemelerin özelliğine ve kalınlığa göre lazerin güç ve hız parametreleri değişkenlik gösterir. Şekil 4.6’da karbon çelikleri için, lazer gücü, kaynak hızı ve kaynatılacak parçaların kalınlıkları arasındaki karşılaştırma görülmektedir.



Şekil 4.6 Kalınlıklarına göre karbonlu çelik levhalar için kaynak hızının (CO_2) lazer gücüne göre değişimi. (Uzun, 2010).

Kaynağa başlamadan önce lazer ışınının odak ayarı, kaynaklanacak bölgenin alanına uygun olarak yapılmalıdır. Odaklama ile ilgili görsel Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Işının çıkış noktasının malzemeye olan uzaklığı arttıkça ışık demeti çapı artar ve ergiyen metalin miktarında da artış olur. Bu durumda kaynağın derinliğinde azalma meydana gelir. Dolayısıyla mercekler, malzemenin özelliği, kalınlık ve kaynağın hızı dikkate alınarak, bu mesafenin olabildiğince kısa ayarlanması önem arz eder. (Uzun, 2010).



Şekil 4.7 Odaklama düzeneği şekilsel görünümü. (Uzun, 2010)

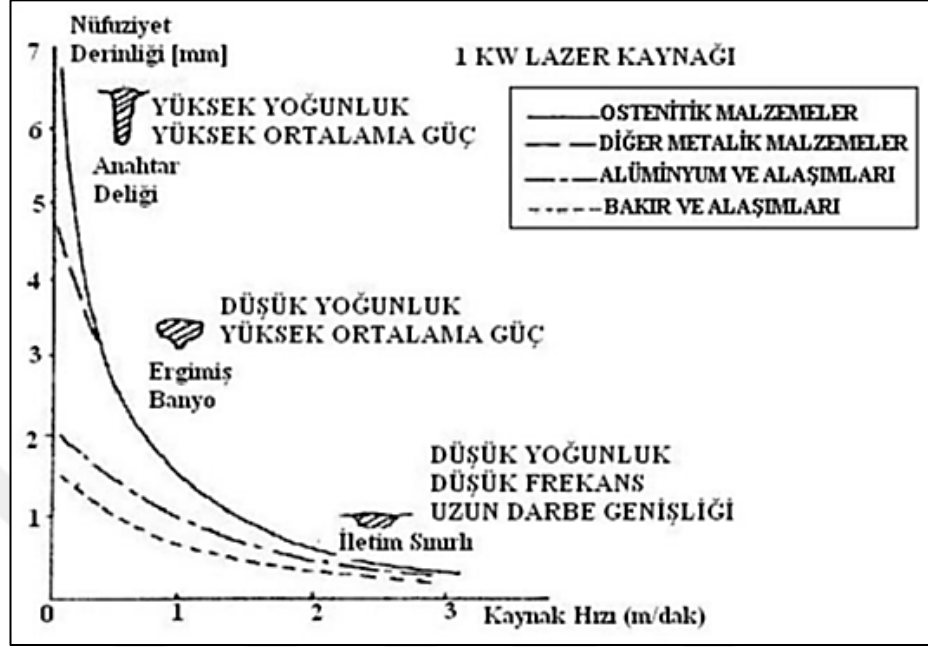
Lazer kaynağının önemli parametreleri şunlardır:

- Güç
- Darbe Süresi
- Darbe Frekansı
- Işın Çapı

4.3.1 Lazer Gücü

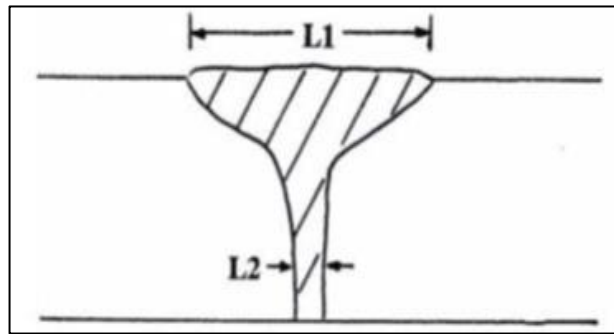
Kaynağın derinlik miktarının belirlenebilmesi için temel parametreler olan lazer gücünün, kaynak hızına olan oranını belirlemek gerekir. Dikey ekseninde nüfuziyet derinliği (d), yatay ekseninde ise kaynak hızı (v) belirlendiğinde sabit bir lazer gücü seçilebilir. Şekil 4.8’de 1 kW güç kapasitesine sahip Nd:YAG lazer kaynağının farklı malzemelerin kaynaklanması ve birbirinden farklı parametrelerde kaynak işlemi yapılması sonucunda oluşan kaynak bölgesinin şekli gösterilmiştir. Nüfuziyet derinliği

ya da kaynağın hız eğrisi fonksiyon olarak $d=c/v$ formülü ile hesaplanır (c sabit değerdir). (Hoult, 1990).



Şekil 4.8 1 kW Nd:YAG lazerinin kaynak performansı (Hoult, 1990)

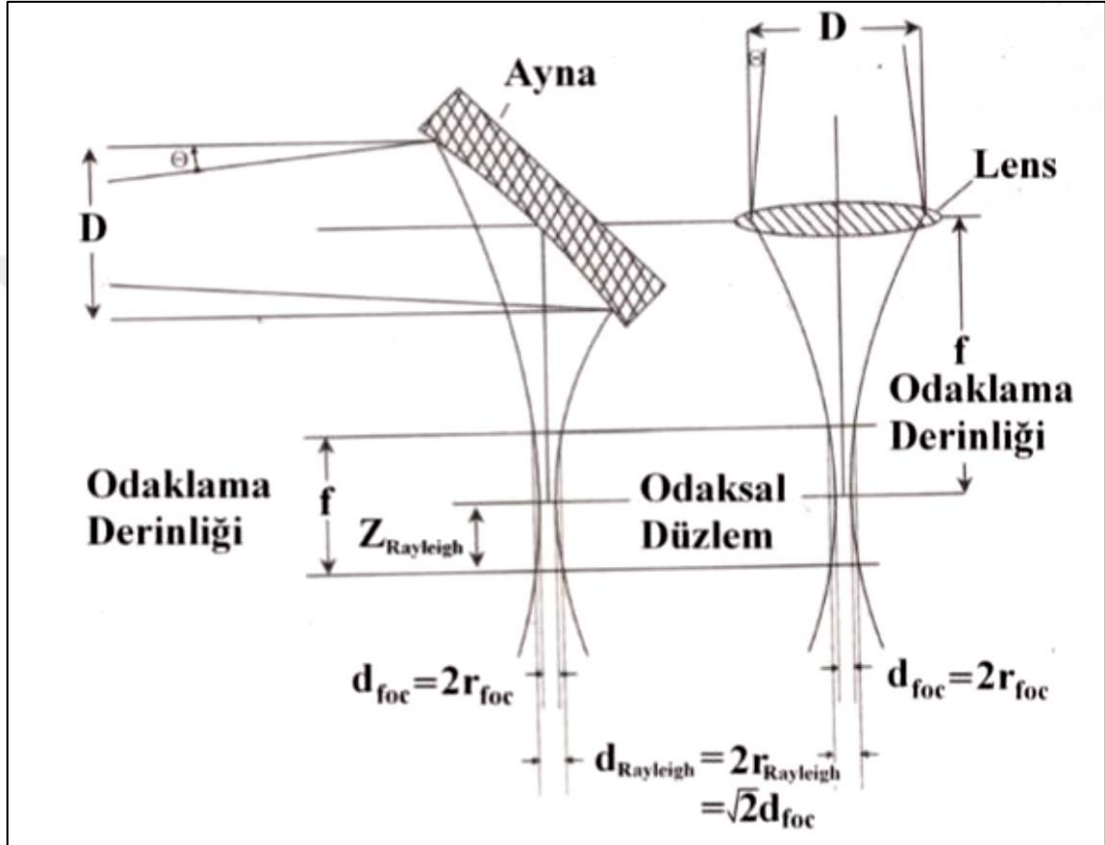
Kaynağın hızı ile kaynağın dikiş genişliği birbiri ile bağıntılıdır. Şekil 4.9’da bir kaynağın profiline ait şema görülmektedir. Kaynağın üst kısmındaki dikiş genişliği (L1), kaynağın altta kalan derin kısmındaki ölçüsünden (L2) fazladır. Bu değer, kaynağın hızı ve lazerin yoğunluk değerine göre değişkenlik göstermektedir. (Duley, 1998).



Şekil 4.9 Kaynak dikişi formu (Duley, 1998)

4.3.2 Odaklama

Odaklamanın uygun yapılması kaynağın kalitesine etki eden önemli bir faktördür. Lazer kaynağında ışının odaklanma işleminin yapılmasına dair şema Şekil 4.10'da gösterilmiştir. (Wirth, 2004).



Şekil 4.10 Lazer ışınının odaklanması, ayna veya lens kullanılması (Wirth, 2004)

Lazer yoğunluğunda odak mesafesi arttıkça azalma meydana gelir. Yine derinlemesine lazer kaynağında anahtar deliğinin oluşmasına odaklama direkt olarak etki etmektedir (Duley, 1998).

4.3.3 Koruyucu Gaz

Koruyucu gaz seçimi lazer kaynak işleminde önemli bir parametredir. Koruyucu gazın belirlenmesinde kaynak işlemi yapılacak metalin gaz ile etkileşiminin bilinmesi önem arz eder. Lazer kaynağı ile kullanılan koruyucu gazın plazma oluşumunu düşürmesi arzu edilir. Böylelikle iyi bir kaynak nüfuziyeti sağlanmış olur. Koruyucu gazın en

önemli amacı kaynak bölgesinin oksidasyona uğramasını önlemektir. Diğer amacı ise, kaynak bölgesinde plazma oluşmasını önlemektir.

Koruyucu gaz olarak genelde Helyum ve Argon gazları tercih edilir. Özellikle yüksek iyonizasyon enerjisi sebebiyle Helyum gazı tercih edilmektedir. Azot gazı bazen Helyum yerine kullanılmaktadır. Özelliklerin çoğu benzerdir. Azot'un tercih edilmesinin en önemli sebebi maliyetinin düşük oluşudur.



5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür araştırması kapsamında lazer kaynak ve kaynak işlemi uygulanmış paslanmaz çeliklerin literatürde yer alan mekanik ve mikroyapı incelemeleri araştırılarak aşağıda özetlenmiştir.

Torkamany vd., düşük karbonlu ve östenitik paslanmaz çeliklerin lazer nokta kaynaklarının mikroyapı ve mekanik performansına lazer kaynağı modunun etkisi üzerine çalışmışlardır. Yapılan çalışmada düşük karbonlu çelik tabakanın, östenitik tabakanın mekanik mukavemetinin belirlenmesinde zayıf tabakadaki füzyon bölgesi büyüklüğünün kontrol edici faktör olduğu gösterilmiştir (Torkamany, vd., 2012).

Baruah vd., modern endüstriyel gereksinimler için Ti6Al4V alaşımında Nd:YAG lazer kullanarak lazer ısı kaynağının darbe parametreleri üzerine çalışmışlardır. Çalışma sonucunda, lazer ısı kaynağının darbe parametrelerinin kaynak bağlantı yapısında önemli bir etkiye sahip olduğunu ve parametre seçimindeki zorluğun, kaynak işlemi yapılacak numunelerin geometrik boyutlarının azalması ile artacağını göstermişlerdir (Baruah ve Bag, 2017).

Junhao Sun vd., lazer kaynağı ile alüminyum alaşımı ve düşük karbonlu çelik gibi birbirinden farklı iki malzemenin birleştirilmesi üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada, belirtilen iki farklı malzeme tipinin lazer mikro kaynak yöntemi ile birleştirilebilir olduğunu göstermişlerdir (Sun, vd., 2015).

Çalığülü vd., CO₂ lazer ışını kullanarak farklı mikroyapı özelliklerine sahip 4 mm kalınlıktaki AISI 430 ferritik ve AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, 100-200-300 cm/dk hızda argon ve helyum atmosferlerinde lazer ışın kaynağı 2000 ve 2500 W güç girişlerinde tutularak deneyler yapılmış ve ısıdan etkilenen bölgelerde mikroyapı, SEM, EDS ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde artan kaynak hızına bağlı olarak kaynak bölgesi ve ITAB (ısı tesiri altında kalan bölge) genişliğinin, çok daha ince hale gelirken artan ısı girişine bağlı olarak büyüdüğü gözlemlenmiştir. Mikroyapı, mikrosertlik ve çekme dayanımı (524 MPa) açısından en iyi özellikler, helyum atmosferinde ısı

girdisinin 2500 W ve kaynak hızının 100 cm/dak olduğu durumda elde edilmiştir (Çalığölü, vd., 2010).

Kaya ve Kahraman yaptığı çalışmada, kalınlığı 3 mm olan 304 östenitik paslanmaz çelik ve yine aynı kalınlıktaki 430 ferritik paslanmaz çeliği örtülü elektrod ark kaynağı, TIG ve MIG yöntemleri ile birleştirerek malzemelerin çentik darbe dayanımı, çekme dayanımı, mikroyapı ve mikrosertlik özelliklerini incelemiştir. Tüm numunelerde çekme testleri sonucu kopmalar, ferritik paslanmaz çeliğin ana metal tarafında kaynak metaline yakın olan ITAB'da gerçekleşmiştir. TIG kaynağı ile birleştirilen kaynak bağlantısında en yüksek çekme dayanımı elde edilmiştir. Çentik darbe testlerinde, çentik darbe kırılma değerinin, TIG ve MIG kaynak yöntemleri ile birleştirilen bağlantılara göre ark kaynağı kullanılarak birleştirilen kaynak bağlantısında çok düşük olduğu belirlenmiştir. Mikrosertlik test sonuçlarında, en yüksek değer 430 ferritik paslanmaz çeliğin ana metal tarafında kaynak metaline yakın olan ITAB'da ölçülmüştür. Mikroyapı analizlerinde, 430 ferritik paslanmaz çelikte ısı tesiri altındaki bölgede tane büyümesinin meydana geldiği gözlemlenmiştir (Kaya ve Kahraman, 2011).

Köse ve Kaçar tarafından, 95x330x4 mm ölçülerindeki 420 martenzitik paslanmaz çelik CO₂ lazer kaynağıyla birleştirilerek kaynak bağlantısının mekanik ve metalurjik özellikleri incelenmiş ve çalışma neticesinde, öncesinde hiçbir işleme tabi tutulmadan birleştirilen numunelerde mekanik özelliklerin arzu edilen değerlerin altında kaldığı tespit edilmiştir. Kaynak öncesinde ön tavlama ve kaynak sonrasında da gerilme giderme ısı işlemleri uygulanan numunelerde martenzit yapının temperlenmesiyle ITAB ve kaynak metali bölgelerinde mikro çatlak yayılımının önlenmesi sağlanarak arzu edilen ve kabul edilebilir mekanik özellikler (çekme dayanımı 613-623 MPa, akma dayanımı 303-304 MPa ve uzama değeri %25-26) elde edilmiştir (Köse ve Kaçar, 2015).

Shah vd., lazer kaynağı ile 304 östenitik paslanmaz çeliğinin birleştirilmesi sırasında kaynak bölgesindeki sıcaklık ve hız alanının genişliği, erime ve katılaşma davranışları, penetrasyon derinliği ve yayılım hacmini incelemişlerdir. Gerçekleştirilen boyutsal analizler, yayılım bölgesinin taşınımının ısı transferi ve yayılım bölgesi geometrisi

üzerinde önemli bir rolü olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada sıcaklık gradyanları, katılma oranları ve soğutma oranları gibi ilgili katılma parametreleri yayının bölgesinin katılma davranışını analiz etmek amacıyla açıklanmıştır. Katılma ilerledikçe yayının bölgesi ara yüzündeki alanın, sıcaklık gradyanının azaldığı ve katılma oranının arttığı gözlemlenmiştir (Shah, vd., 2018).

Soltani ve Tayebi, TIG ve Nd:YAG lazer kaynağı ile karşılaştırmalı olarak AISI 304L - AISI 316L paslanmaz çelik kaynak bağlantılarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar neticesinde, TIG kaynağında kaynak derinliğinin lazer yöntemine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte TIG ve lazer kaynak ile birleştirilen numunelerin dayanıklılığı ve tokluğunun voltaj arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Lazer kaynağında spot destek boyunun arttırılması, TIG kaynağında ise kaynak sırasında destek gazının varlığı, numunelerin mukavemet, tokluk ve sertliğinin artmasına sebep olmuştur (Soltani ve Tayebi, 2018).

Alcock ve Baufeld, 304L östenitik paslanmaz çelikte diyot lazer kullanarak derin penetrasyon kaynağının elde edilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. 10 mm kalınlığında olan östenitik paslanmaz çelik plakaların alın kaynağı, 12 kW'lık lazer gücü ve 1,5 m/dk'lık kaynak hızı parametreleriyle kaynak uzunluğu boyunca tam penetrasyon ile başarılı bir şekilde yapılmıştır (Alcock ve Baufeld, 2017).

Fuerschbach ve Eisler, ergime ve emilim üzerine lazer nokta kaynak enerjisinin ve süresinin etkisini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada, net ısı girişi için 304 östenitik paslanmaz çelik numunesi üzerinde kalorimetrik ölçümler yapılmıştır. Darbeli Nd:YAG lazer nokta kaynakları için 304 östenitik paslanmaz çelik üzerindeki enerji emiliminin kalorimetrik ölçümlerinin %38- %67 arasında değiştiği, kaynak nüfuziyeti veya ışın yoğunluğu ile korelasyon göstermediği gözlenmiştir. Numune üzerine aynı enerjiye sahip kısa süreli 2,2 ms lazer darbeleri uygulandığında, uzun süreli 7 ms lazer darbelerine göre daha derin kaynak nüfuziyeti sağlandığı tespit edilmiştir (Fuerschbach ve Eisler, 2003).

Çelen, yaptığı çalışmada paslanmaz çeliğin lazer kaynağının dayanım ve korozyon özelliklerini kaynak parametreleri açısından incelemiştir. Yapılan çalışmada darbeli

Nd:YAG lazer kaynağı ile 304 kalite östenitik paslanmaz çelik kullanılmıştır. Darbe süresi arttıkça çekme dayanımı değerinin arttığı gözlenmiştir. 309,3 MPa olmak üzere en yüksek çekme dayanımı değerine 8,5 ms darbe süresi ile ulaşılmış ve kopma ana metal bölgesinden gerçekleşmiştir. İdeal gerilim değeri 250 V olarak belirlenmiş ve daha düşük gerilim değerleri uygulandığında çekme testinde kopma kaynak bölgesinde gerçekleşmiştir (Çelen, 2006).

Kahraman vd., yapmış oldukları çalışmada, 90MnCrV8 takım çeliği ve AISI 304 östenitik paslanmaz çeliği örtülü elektrot ile ark kaynağı yöntemi ile birleştirmişlerdir. X kaynak ağzı açılmış olup çok paso kaynak ile kaynak tamamlanmıştır. Metalografik incelemeler sonucunda; kontrollü soğuma için tozaltı tozu içinde soğutulmuş olan yüzey kısımlarda yüksek soğuma hızından dolayı martenzit yapı görülmüştür. İçyapı bölgesinde ise delta ferrit oluştuğu tespit edilmiştir. Isı tesiri altında kalan bölgelerde karbon artışına bağlı olarak martenzit yapı oluştuğundan dolayı en yüksek sertlik değeri 90MnCrV8 takım çeliğinin ITAB'ında tespit edilmiştir. AISI 304 çeliği ile ITAB ve kaynak dolgusu arasında dengeli bir sertlik dağılımı gözlenmiştir (Kahraman vd., 2017).

Kumar ve Sinha, yapmış oldukları çalışmada, 1.4 mm kalınlığında 304L ve St37 plakaları sabit darbe frekansı (25 Hz), tarama hızı (6 mm/s), darbe enerjisi (17 J) ve 6 farklı darbe genişliği (3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6 ms) parametreleri ile darbeli Nd-YAG lazer kaynağı yöntemi ile birleştirmişlerdir. Değişen darbe genişliği parametrelerine göre ortalama mikrosertlik 3.5 ms parametresinde en yüksek ortalama değere sahip olup 364.5 HV'dir. En düşük ortalama değer 6 ms parametresinde 322.7 HV olarak ölçülmüştür. Çekme testleri sonucunda çekme mukavemetinin artan darbe genişliğine rağmen sabit kaldığı gözlenmiş olup, kopma pozisyonunun St 37 karbon çeliği tarafında gerçekleşmesi kaynaklı bağlantının ana metal olan St 37'ye eşdeğer mukavemette olduğunu ortaya koymuştur (Kumar ve Sinha 2018).

Bilen, yapmış olduğu çalışmada Hardox 400 Çeliği ve AISI 304 Paslanmaz çeliği Plazma Ark Kaynağı yöntemiyle değişen parametrelerle kaynak ederek kaynak parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışma amacıyla 4 mm kalınlığında Hardox 400 çeliği ve AISI 304 paslanmaz çelik kullanılmıştır. Deney parçaları küt alın

kaynağı formunda, kaynak ağzı açılmadan ve ilave metal kullanılmadan farklı kaynak parametrelerinde yatay pozisyonda kaynak edilmiştir. Kaynak sonrası numunelere tahribatsız muayene, tahribatlı muayene, çekme testi ve SEM incelemesi yapılmış olup ayrıca ısı tesiri altında kalan bölgede sertlik testi yapılmıştır (Bilen, 2016).

Kahraman vd., ark kaynak yöntemi ile östenitik paslanmaz çelikler ve düşük karbonlu çeliklerin birleştirilmesi çalışmasında, elektrik ark kaynak yöntemi kullanarak farklı elektrotlarla birleştirme işlemi yapmış ve elde edilen numunelere çekme, eğme ve sertlik testleri uygulamış olup, ayrıca mikroyapı özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada kullanılan östenitik paslanmaz çelik türü AISI 304 çelik olup kullanılan elektrot cinsi ise AS P 347'dir. Yapılan deneyler sonucunda, çekme deneyi sonucunda kopmanın kaynak bölgesinde değil düşük karbonlu çelikte meydana geldiği saptanmıştır. Eğme deneyi sırasında gözle yapılan inceleme sonucunda herhangi bir yırtılma, çatlak vb. kusura rastlanmamıştır. En iyi eğme deneyi sonuçlarının AS P 347 tip elektrotla elde edildiği saptanmıştır. Sertlik deneyleri sonucunda ise kaynak metali sertliğinin diğer malzemelerden yüksek olduğu saptanmıştır. Kaynak metalinde ilave metal doğru seçilirse kaynak mukavemeti yüksek olmaktadır (Kahraman vd., 2002).

Yılmaz, östenitik paslanmaz çelikleri lazer kaynağı ile birleştirmiş ve mekanik özellikleri incelemiştir. Bu çalışma için AISI 304 tipi paslanmaz çelik kullanılmıştır. Elde edilen kaynaklı bağlantılara; çekme deneyi ve kaynak boyunca mikro sertlik deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyi sonrasında kopan parça yüzeylerine SEM ile yüzey incelemesi yapılmıştır. Deneyler sonucunda akma dayanımı yaklaşık olarak 316 MPa, çekme dayanımı 673 MPa ve yüzde uzaman miktarı %75 olarak elde edilmiştir. Lazer kaynağı ile elden edilen numunelerin değerleri ise yaklaşık olarak akma dayanımı 295 MPa, çekme dayanımı 481 MPa ve yüzde uzama %16 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen verilerde dayanım ve diğer faktörlerin azaldığı görülmüştür. Bu kaynak metali ve yöntemi malzeme ile kullanılabilir değildir (Yılmaz, 2017).

Gözütok, paslanmaz çelikleri TIG kaynağı ile birleştirerek mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada paslanmaz çelik olarak AISI 304 östenitik paslanmaz çelik saçlar 3 farklı koruyucu gaz altında kaynak edilerek mekanik özelliklerinin incelemesi yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda; en yüksek sertlik değerleri üç farklı gaz

içinde kaynak metalinde, sonra sırasıyla ITAB ve ana malzemede tespit edilmiştir. Çekme testlerinde kopmalar ITAB’da meydana gelmiştir. Ayrıca çekme testleri sonrasında en düşük çekme sonuçlarının saf argon gazıyla yapılan kaynaklı bağlantıda olduğu tespit edilmiştir. Eğme testlerinde gözle yapılan muayenede çatlak, yırtılma vb. kusurlara rastlanmamıştır. Yorulma deneylerinde ise kaynaklı birleştirmelerin yorulma sonuçlarının esas metalin yorulma değerlerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Gözütok, 2009).



6. YÖNTEM

Paslanmaz çelikler, korozyona karşı yüksek dayanım göstermesi nedeniyle makine sanayisi başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra kolay şekil verilebilmesi, kaynaklanabilir olması, yük altında çalışma özelliği, gelişmiş mekanik özellikleri, uzun ömürlü olması, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanıma olanak sağlaması paslanmaz çeliği öne çıkaran özelliklerdir. Bu çalışmada yukarıda bahsedilen özellikleri barındırması ve endüstriyel olarak yaygın tercih edilen malzemeler arasında yer alması nedeniyle AISI 304L östenitik paslanmaz çelik tercih edilmiştir.

Paslanmaz çeliklerde lazer kaynak işlemi son yıllarda giderek yaygınlaşmaktadır. İstenilen kaynak profilini elde edebilmek için kaynak dikişi önem arz etmektedir. Kaynak dikişinin şekli, kaynağın parametreleri ve ısı girdisi ile ilişkilidir. Yüksek kaynak kalitesi ve hatasız kaynak işlemi, otomasyon sistemlerinde uygunluğu gibi üstün özelliklerinden dolayı son yıllarda Nd:YAG katı hal lazer kaynağı tercih edilmektedir. Tüm bu özelliklerinden dolayı, bu tez çalışmasında AISI 304L östenitik paslanmaz çelik malzemelerin kaynak işlemlerinde Nd:YAG katı hal lazer kaynağı tercih edilmiştir. Kaynaklı birleştirme işlemleri Setuay Eskişehir Lazer Firmasında bulunan TRUMPF HL 4006 D” lazer kaynak makinesi ve yine bu makineye bağlı FANUC Robot M16i B marka robotik kol ile gerçekleştirilmiştir.

Nitrasyon, malzemelerin yüzey mikroyapılarının değişimi ile mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılan termokimyasal bir yüzey işlemi olarak tanımlanmaktadır. Azot difüzyonu malzeme yüzeyinde mikroyapının değişimini sağlayarak sert bir tabaka oluşturmakta ve malzemenin mekanik özelliğinin değişmesini sağlamaktadır. Çeliklerin sürtünme ve aşınma katsayısındaki artış, sertlik oranı yüksek olan nitrür tabakası ile elde edilebilmektedir. Nitrürlemenin düşük sıcaklıklarda uygulanması sayesinde malzemedeki bozulma minimize edilmektedir. Bu nedenle çeliklerde nitrürleme işlemi, çok önemli bir yüzey sertleştirme işlemi olarak bilinmektedir. Literatür araştırmalarında; AISI 304L östenitik paslanmaz çeliklerin Nd:YAG katı hal lazer kaynağı ile birlikte uygulanan nitrasyon işleminin birlikte değerlendirildiği

çalışmalara çok fazla rastlanılmadığı için bu tez çalışması bahsedilen konu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Nitrasyon işlemleri Bursa’da bulunan Korkmaz Çelik firmasında gerçekleştirilmiştir.

AISI 304L östenitik paslanmaz çelik numunelerin testlere hazırlanması, mekanik testleri ve mikroyapı incelemeleri Eskişehir’de bulunan MEGEM Test Laboratuvarı’nda yapılmıştır. EDS ve SEM analizleri ise Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiştir.

Yöntem bölümünde çalışmada kullanılan malzemelerin mekanik ve kimyasal özelliklerine değinilmiş ve yapılan deneysel çalışmalardan bahsedilmiştir. Deneylere ait parametreler ve kaynak işleminin yapıldığı lazer kaynak cihazı hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir. Mekanik testlerde kullanılan ve makro – mikro yapıların incelendiği cihazların özellikleri ile uygulama yöntemleri bu bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

6.1 Malzeme

Bu çalışmada Birçelik Firmasından temin edilen AISI 304L östenitik paslanmaz çelik ana malzeme olarak tercih edilmiştir. Paslanmaz çelik malzemeler, 150x300x2 mm ölçülerinde sac levha olarak hazırlanmıştır. Kaynak işleminde ilave tel kullanılmamıştır. AISI 304L malzemenin kimyasal kompozisyonu Tablo 6.1’de, mekanik özellikleri ise Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Çalışmada kullanılan AISI 304L malzemenin kimyasal kompozisyonu
[<https://bircelik.com/tr/kategori/304l>]

Malzeme	% C	% Cr	% Mn	% Si	% Ni	% Mo	% Nb	% P	% Fe
AISI 304L	0,018	17,9	1,351	0,442	8,34	0,052	0,021	0,028	Kalan

Tablo 6.2 Deneylerde kullanılan AISI 304L malzemelerinin mekanik özellikleri
[<https://bircelik.com/tr/kategori/304l>]

Kalite 304 (1.4301)	Akma Muk. (min) (Mpa)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Uzama (min) (%)	Sertlik Vickers (HV)
304L	200	485 - 670	40	201

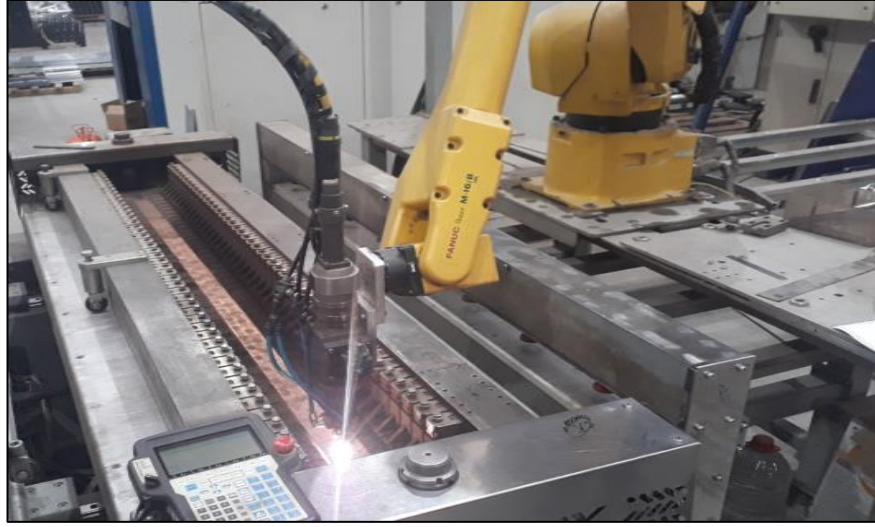
6.2 Lazer Kaynak Cihazı

Plakaların kaynak işlemleri, Şekil 6.1’de gösterilen “TRUMPF HL 4006 D” marka ve model Nd:YAG katı hal lazer kaynak makinesi ile yapılmıştır. Bu cihaz 5 kW'ye kadar lazer gücüne ve 25 mm'lik ışın kalitesine sahiptir. Esnek lazer ışık kabloları sayesinde ışın 100 metre mesafeye kadar iş istasyonlarına taşınabilmektedir. Robotlarla birlikte üretim hatlarına entegrasyon işlemi bu sayede hızlı ve kolay sağlanmaktadır. Alın kaynak işlemi sırasında kaynak bölgesinin oksidasyona maruz kalmaması için kaynaklanan bölgeye, 2 Bar basıncında saf argon gazı uygulanmıştır.



Şekil 6.1 Nd:YAG Lazer Kaynak Cihazı

Lazer kaynak işleminde Şekil 6.2’de görülen “FANUC Robot M16 i B” marka robotik kol kullanılmıştır.



Şekil 6.2 FANUC Robot M16i B marka robotik kol

Alın kaynağında iyi bir kaynak dikişi oluşması için malzemelerin sabitliği önem arz eder. Bu sebeple malzemelere kaynaktan önce Şekil 6.3'te gösterildiği gibi fikstürlerle sıkıca sabitleme işlemi yapılmıştır. Öncesinde ise tam olarak örtüşmenin sağlanması için malzeme yüzeyleri zımparalanmıştır.

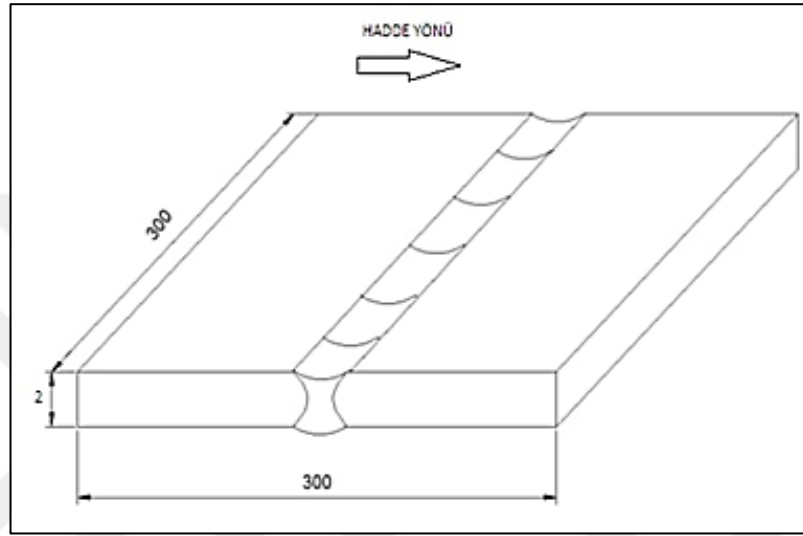


Şekil 6.3 Nd:YAG lazer kaynak işlemleri sırasında numunelerin sabitlendiği fikstür

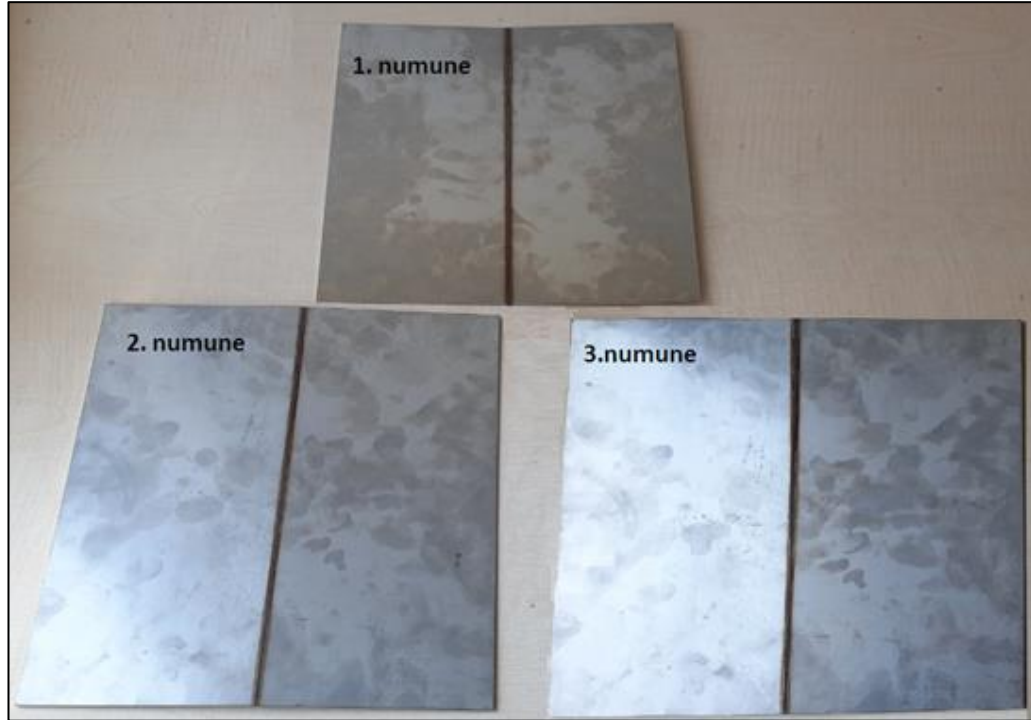
6.3 Lazer Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi

Şekil 6.4'te ölçüleri ve şematik görüntüsü, Şekil 6.5'te ise fotoğrafları görülen 150x300x mm boyutlarında hazırlanan 6 adet levha, öncelikle kaynak işlemi gerçekleştirilecek kenarları zımpara taşında zımparalanmış, sonrasında ise Nd:YAG lazer kaynak yöntemi ile Tablo 6.3'te verilen farklı lazer güçlerinde kaynak işlemine

tabi tutulmuştur. Tablo 6.3'te verilen 1, 2 ve 3 numaralı deneyler, optimum kaynak parametresini belirlemek için 4 ve 5 numaralı deneylerden daha önce gerçekleştirilmiştir. Söz konusu deneyler içerisinde mikroyapı ve mekanik özellikler açısından en iyi sonuçların tespit edildiği 2 numaralı deneye ait parametreler kullanılarak nitrasyon işleminin etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla 4 ve 5 numaralı deneyler daha sonra gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.4 Lazer kaynağıyla birleştirilmiş plakanın ölçüleri



Şekil 6.5 Lazer kaynağıyla birleştirilmiş plakalar

Tablo 6.3 Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri

Numune No	Kaynak Öncesi Nitrasyon İşlemi	Kaynak Sonrası Nitrasyon İşlemi	Lazer Gücü (Watt)	İlerleme Hızı Sabit (mm/sn)	Gaz Basıncı Sabit (Bar)
1	Yok	Yok	1300		
2	Yok	Yok	1500		
3	Yok	Yok	1700	20	2
4	Yok	Var	1500		
5	Var	Yok	1500		

Tablo 6.3'te 4 numara ile belirtilen birleştirme işlemi, 2 numaralı birleştirmede olduğu gibi optimum kaynak parametrelerinde kaynak işlemine tabi tutulduktan sonra nitrasyon işlemi uygulanmak üzere ısıtım işlem merkezine gönderilmiştir. Yine Tablo 6.3'te 5 numara ile belirtilen uygulamada ise kaynak işlemi öncesinde birleştirilecek numunelere nitrasyon işlemi uygulanmıştır. Kaynak işlemi öncesinde nitrasyon işlemi uygulanmış numunelere 2 numara ile belirlenen optimum kaynak parametrelerinde kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6.3'te verilen kaynak parametreleri uygulamasını özetleyecek olursak, 1, 2 ve 3 numaralı deneylerde optimum kaynak parametresini belirlemek için herhangi bir yüzey işlemi uygulamadan, 3 adet farklı lazer gücünde kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı ve mekanik özellikler açısından optimum sonucu veren 2 numaralı birleştirmeye ait parametreler baz alınarak kaynak öncesi ve sonrasında nitrasyon işlemlerinin uygulandığı 4 ve 5 numaralı deneyler gerçekleştirilmiştir. 4 ve 5 numaralı deneylerde kullanılan malzemelerin kaynak işlemi öncesi ve sonrası nitrasyon işlemi uygulanmış görüntüleri Şekil 6.6'da verilmiştir. Bu sayede aynı parametrelerde kaynak işlemine tabi tutulan herhangi bir işlem görmemiş 2 numaralı deney, önce kaynak işlemi uygulanmış sonra nitrasyon işlemi uygulanmış 4 numaralı deney ve önce nitrasyon işlemi uygulanmış, daha sonra kaynak işlemi uygulanmış 5 numaralı deney birbirleriyle mukayese edilerek nitrasyon işleminin kaynak işlemi üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Literatürde kaynak işlemi öncesinde numunelerin yüzeylerinin iyi temizlenmiş olması ve yüzey üzerinde herhangi bir işlemin olmaması gibi konularla ilgili birçok açıklama mevcuttur. Tamir ve bakım kaynağı uygulamaları gibi ulaşılması güç, anında ve yerinde işlem yapılması gereken

parçaların kaynaklı birleştirme işlemleri düşünülerek, bu tez çalışmasında 5 numaralı deneyde, kaynak işlemi öncesinde nitrasyon işlemi uygulanan numunelere lazer kaynağı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.6 Nitrasyon işlemi görmüş plakalar

6.4 Nitrasyon İşleminin Uygulanması

Nitrasyon işlemleri Bursa'da bulunan Korkmaz Çelik firmasına ait 1500 kg kapasiteli, ve 16 Bar Azot ve Hidrojen soğutma kapasitesine sahip ısıtıl işlem fırınında gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.7'de ısıtıl işlem fırınına ait resim görülmektedir.



Şekil 6.7 Isıl işlem fırını

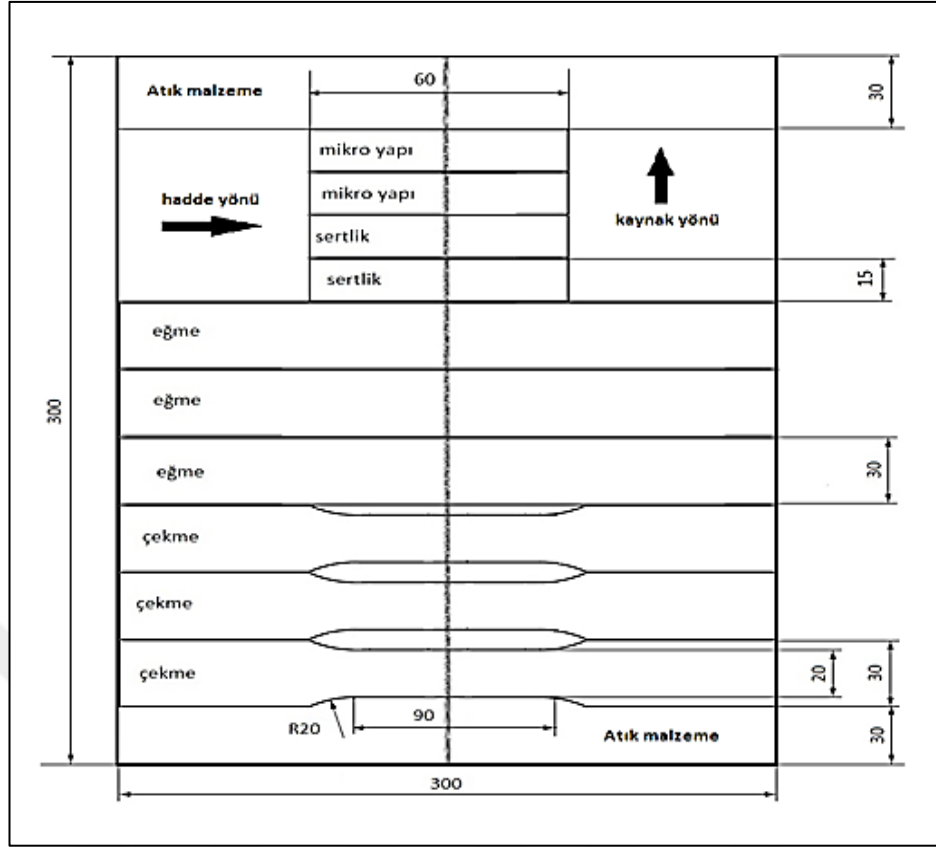
4 ve 5 no'lu numunelere K_n 2,2 değerinde kontrollü gaz nitrasyon işlemi uygulanmıştır. Fırın atmosferi olarak amonyak gazı (NH_3) ve karbondioksit gazı (CO_2) birlikte kullanılmış olup, fırın sıcaklığı 300°C, ortamı ise %100 NH_3 'tür. Cihazın çevresindeki CO_2 gazı etkisi ile fırın sıcaklığı 580°C'ye yükselir. Bu aşamada, %90 NH_3 ve %10 CO_2 gazı bulunmaktadır. Bu ortam ve istenilen 120 dakika bekledikten sonra %100 azot ortamı soğutma gerçekleştirilmiştir. Nitrasyon işlemine ait parametreler Tablo 6.4'te verilmiştir. 4 ve 5 numaralı deneylerde kullanılan malzemelerin kaynak işlemi öncesi ve sonrası nitrasyon işlemi uygulanmış görüntüleri ise daha önce Şekil 6.6'da verilmiştir.

Tablo 6.4 Nitrasyon işlemine ait parametreler

Nitrasyon işleminde kullanılan gazlar	NH_3 , CO_2
Ön ısıtma	300 °C
Kademeli ısıtma	580 °C'ye kadar
580 °C'de tutma süresi	120 dakika
Soğutma ortamı	Azot

6.5 Numunelerin İncelemeler İçin Hazırlanması

Kaynak uygulamasından sonra, metalografik incelemeler için numuneler Setuay-Eskişehir Lazer firmasında TS EN ISO 6892-1 ve TS EN ISO 5173 standartlarına uygun olarak 300x300x2 mm ölçülerindeki plakalardan 3 adet çekme, 3 adet eğme, 2 adet mikroyapı, 2 adet sertlik numunesi çıkarılarak alınmıştır. Şekil 6.8'de standarda uygun olarak plaka üzerinden alınan numune ölçüleri şematik olarak belirtilmiştir.



Şekil 6.8 Plaka üzerinden alınan numune ölçüleri

Numunelerin kesme işlemleri kaynak dikişi tam merkezde kalacak şekilde yapılmıştır. Şekil 6.9 ve 6.10’da standartlara uygun ölçülerde kesilmiş numunelere ait fotoğraflar görülmektedir.



Şekil 6.9 Plakalardan kesilen numuneler

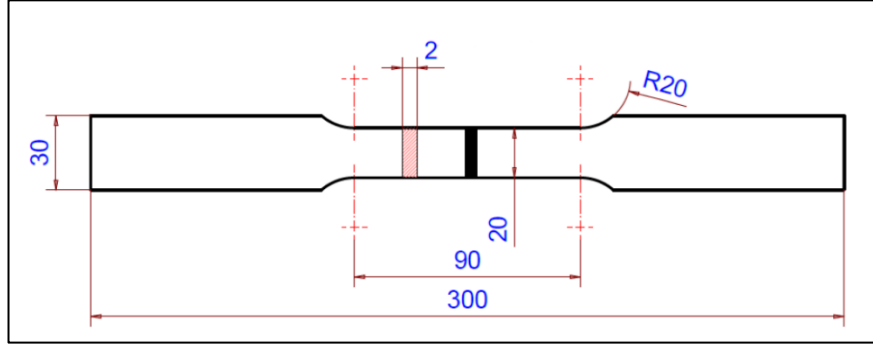


Şekil 6.10 Bir plakadan kesilen tüm inceleme numuneleri

6.6 Çekme Testi

Çekme testine tabi tutulacak lazer kaynaklı AISI 304L paslanmaz çelik numuneler, TS EN ISO 6892-1 standardına uygun şekilde hazırlanmıştır. Çekme testi numune ölçüleri

Şekil 6.11’de verilmiştir. Kesilen numuneler, Şekil 6.12’de gösterilen Alşa marka 600 kN kapasiteli cihazda çekme testine tabi tutulmuştur.



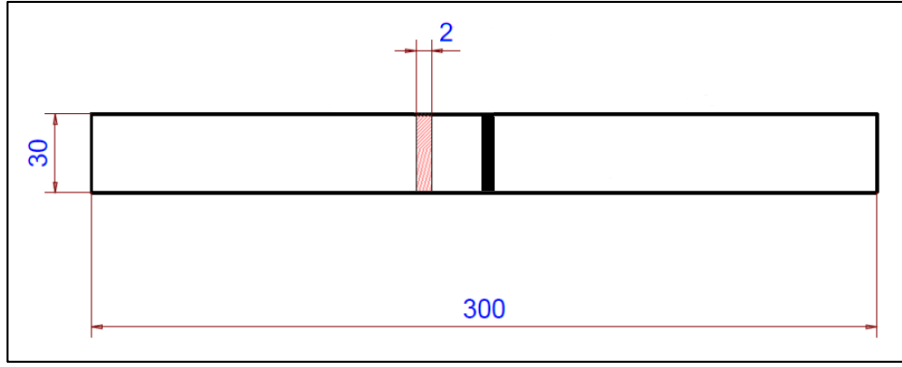
Şekil 6.11 Çekme testi numune ölçüleri



Şekil 6.12 Alşa marka test cihazı

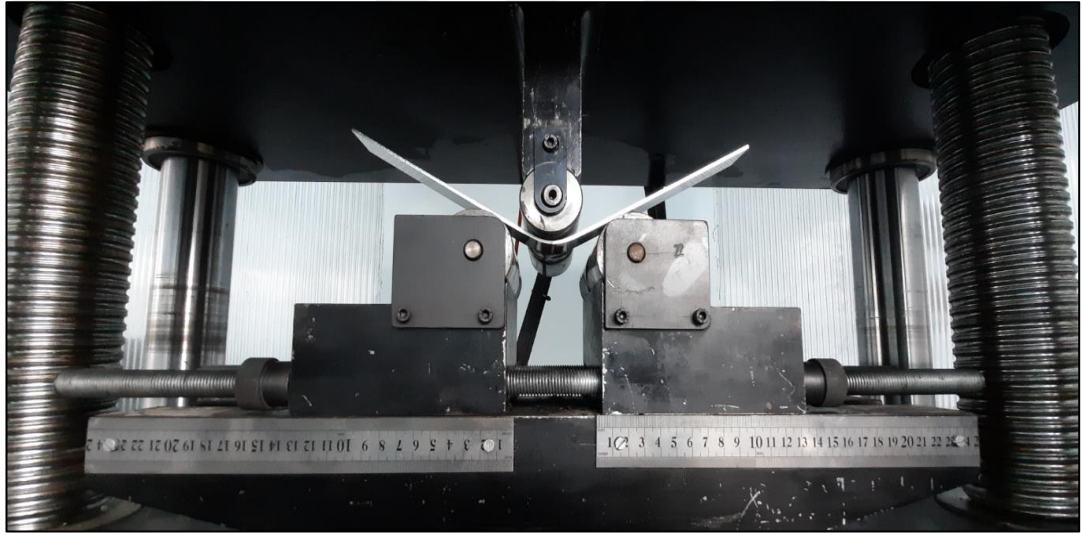
6.7 Eğme Testi

Lazer kaynaklı AISI 304L paslanmaz çelik numuneler, eğme testleri için, TS EN ISO 5173 standardına uygun olacak şekilde hazırlanmıştır. Numune boyutları Şekil 6.13’te verilmiştir.



Şekil 6.13 Eğme testi numune ölçüleri

Her numuneden kep ve kök tarafından eğilmek üzere hazırlanan numuneler Şekil 6.14’te görülen Alşa marka cihazda eğme testine tabi tutulmuştur.



Şekil 6.14 Numune üzerinde eğme testinin uygulanması

Şekil 6.14’te görülen numune uç kısımlarından iki adet serbest mafsallara yerleştirilerek, kaynaklı numunelerin tam ortasındaki kaynak bölümünden 90 derece bükülene kadar yük uygulanmıştır.

6.8 Metalografik Analiz

Kaynak yapılmış numunelerin içyapı incelemelerinin detaylı gözlemlenebilmesi için, numunelere optik mikroskop ve SEM’de analiz edilmek üzere metalografi işlemleri uygulanmıştır. Metalografi işlemleri Eskişehir’de bulunan ve TÜRKAİ tarafından akredite olmuş MEGEM laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.15'te görülen Metkon Forcipol 2V marka zımpara ve parlatma cihazı ile sırasıyla 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gridlik zımparalama işlemleri yapılmıştır. Ardından 3 µm ve 1 µm'lik solüsyonlarla parlatma işlemleri uygulanmıştır.



Şekil 6.15 Zımparalama ve parlatma cihazı

Parlatılmış numuneler, Marble Çözeltisi (4g CuSO₄, 20 ml HCl, 20 ml su) ile dağlandıktan sonra; makro incelemeler Şekil 6.16'de gösterilen max. 50X miktarında büyütme oranına sahip Nikon SMZ745T model mikroskop, mikro incelemeler ise Şekil 6.17'de gösterilen Nikon Eclipse MA100 model mikroskop yardımıyla incelenmiştir.

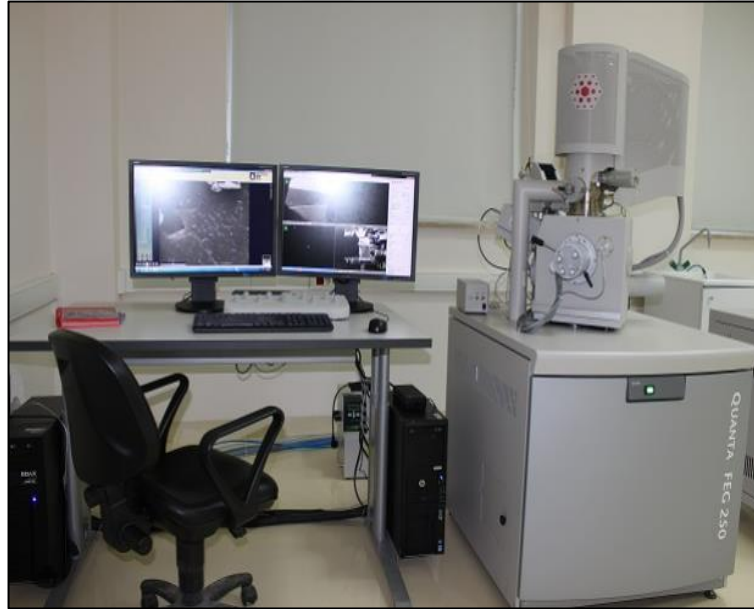


Şekil 6.16 Nikon SMZ745T dijital görüntüleme cihazı



Şekil 6.17 Nikon Eclipse MA100 mikroskop

AISI 304L paslanmaz çelik numuneler, Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Şekil 6.18’de gösterilen FEI marka Quanta Feg 250 model SEM cihazıyla 500-1000-2500-5000 büyütme oranlarında incelenmiştir.

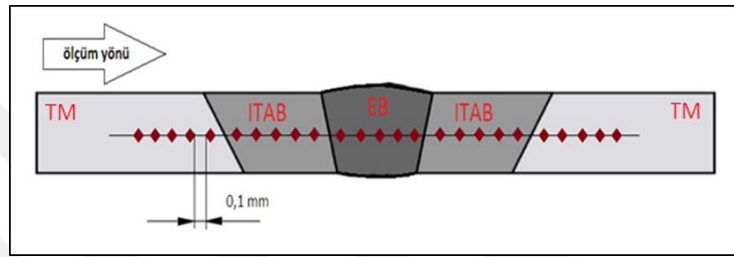


Şekil 6.18 FEI Quanta Feg 250 SEM dijital görüntüleme cihazı

6.9 Mikrosertlik Testi

Mikrosertlik ölçümü ana malzemedan başlayarak kaynak bölgesine ilerleyen ve tekrar ana malzemeyle sonuçlanan doğrusal bir hatta yapılmıştır. Temel (ana) malzeme

(TM), ergime bölgesi (EB) ve ısının tesiri altındaki bölgelerden (ITAB) 0,1 mm aralıklarla 5'er ölçüm alınmıştır (Şekil 6.19). Sertlik ölçümleri, 100 gr. yük, 10 sn süresince uygulanarak numunenin 5 farklı bölgesinden (Şekil 6.19) toplam 25 ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiş ve ortalama mikrosertlik değerleri hesaplanmıştır. Lazer kaynağı ile birleştirilen AISI 304L paslanmaz çelik numunelerin mikrosertlik ölçümleri Şekil 6.20'de gösterilen Metkon Duroline-M marka cihaz yardımıyla ve Vickers sertlik ölçme metoduyla 136°'lik piramit elmas uç kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.19 Sertlik ölçüm noktalarının şematik görüntüsü



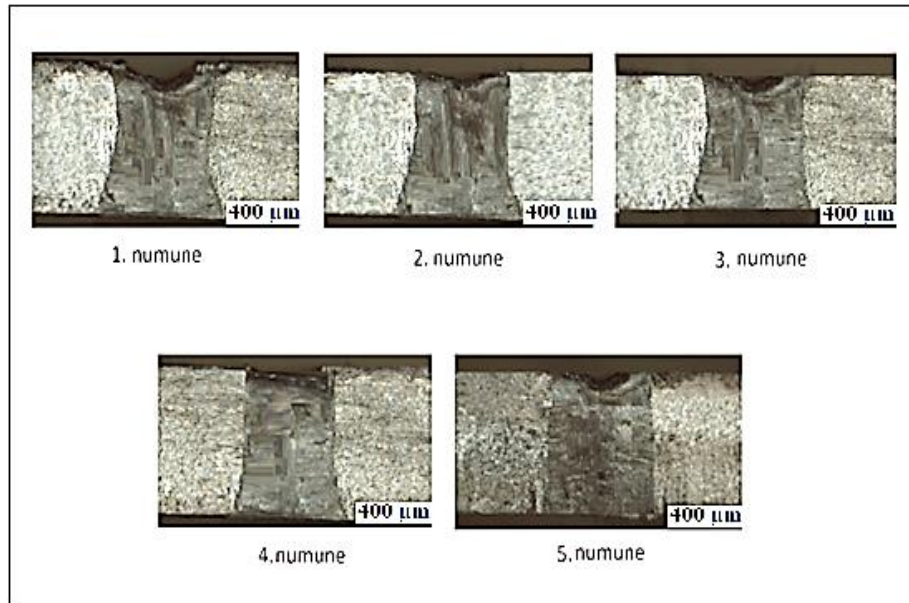
Şekil 6.20 Metkon Duroline-M sertlik ölçüm cihazı

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1 Metalografik Analiz Bulguları

7.1.1 Makroyapı İnceleme Bulguları

Makro incelemeler çerçevesinde, numunelerin nüfuziyet şekli ve kaynak geometrisi Nikon SMZ745T model cihaz ile x5 oranında büyütülerek incelenmiştir. Bu sayede parametrelerin kaynak geometrisine olan etkileri değerlendirilmiştir. Şekil 7.1’de verilen makroyapı görüntülerinin incelenmesi sonucunda tüm numunelerde kaynak nüfuziyetinin istenildiği şekilde oluştuğu, yine kaynaklı yüzeyin ve kök yüzeyine ait şeklin uygun olduğu görülmüştür. Ergime bölgesi ve ana malzemenin birbirinden net bir şekilde ayrıldığı görülürken, parlak tanelerin olduğu ısının tesiri altındaki bölgenin tane yapısı farklılığı ve çok dar bir alanda oluştuğu göze çarpmaktadır. Bu yöntemde ergime derecesine hızla ulaşip, hızlı soğuma neticesinde oda sıcaklığına tekrar hızlı bir iniş nedeniyle ITAB’ların dar bir alanda oluştuğu düşünülmektedir. Şekil 7.1’de 1. numunede kaynak dikişinin yüzeyinde görülen çökme nedeniyle bu parametrenin kaynak işlemi için uygun olmadığı anlaşılmaktadır. Diğer görüntülerde ise bir miktar çöküntü oluşmasına rağmen daha iyi dikiş formları elde edilmiştir.



Şekil 7.1 Numunelerin makro görüntüleri

7.1.2 Mikroyapı İnceleme Bulguları

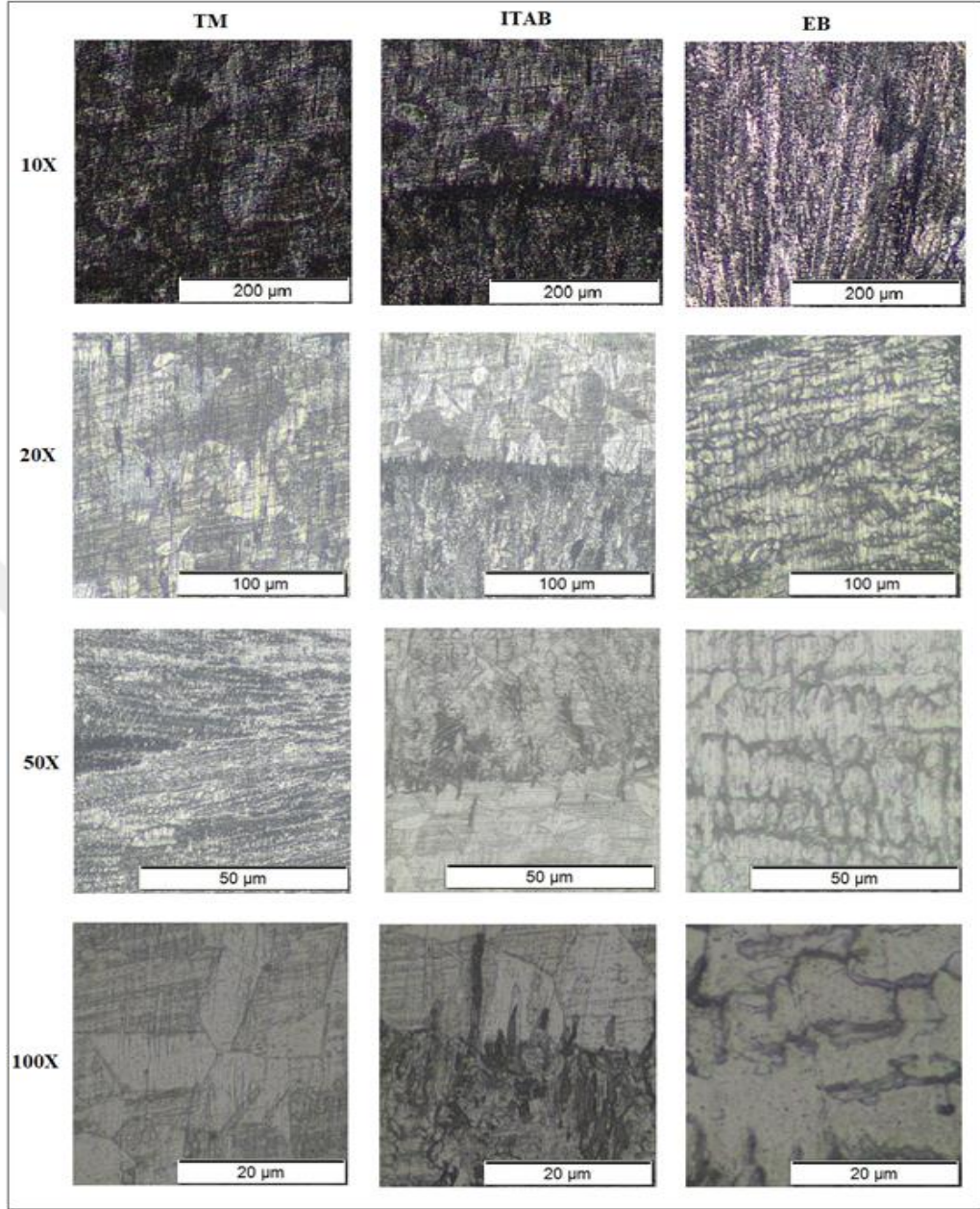
Lazer kaynaklı numunelerin TM, ITAB, EB bölgelerindeki görüntüler, optik mikroskopta x10, x20, x50 ve x100 büyütmelemlerde alınmıştır. Deneylerden elde edilen mikroyapı görüntüleri Şekil 7.2 – Şekil 7.6 arasında verilmiştir.

Kaynaklı numunelerin TM, ITAB, EB bölgelerindeki SEM görüntüleri ise, x500, x1000, x2500 ve x5000 büyütmelemlerde alınmıştır. SEM görüntüleri ise sırasıyla Şekil 7.7 – Şekil 7.11 arasında verilmiştir.

Lazer kaynakla birleştirilmiş östenitik paslanmaz çeliklerin mikroyapı görüntüleri genel olarak incelendiğinde; kaynak hattının tamamen kaybolduğu, dolayısıyla kaynak nüfuziyetinin tam olarak sağlandığını söyleyebiliriz. Mikroyapıların orijinal malzeme mikroyapısına benzediği ve tane ebatlarının kaynak öncesi morfolojilerini genel olarak koruduğu görülmüştür. Yapılan incelemelerde kaynak dikişinin dendritik yapıda olduğu ve tanelerin merkeze doğru yönlendiği görülmüştür. Lazer kaynağının karakteristik özelliği olarak ana malzemeden kaynak merkezine doğru geçiş bölgesinin dar bir bölgede oluştuğu tespit edilmiştir.

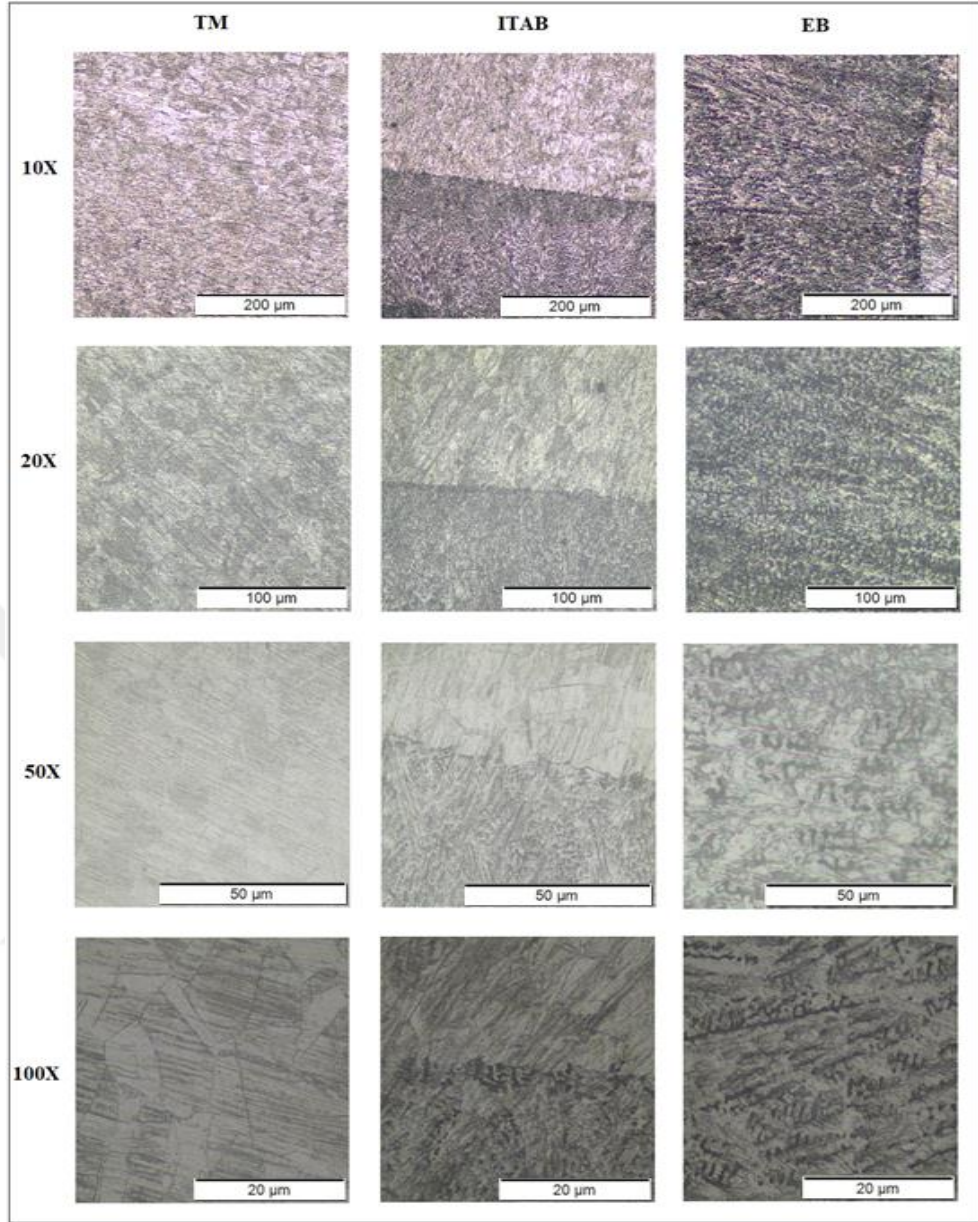
Şekil 7.2’de 1300 W kaynak gücünde lazer kaynak işlemi yapılan 1 no’lu numunenin, TM, ITAB, EB bölgelerindeki x10, x20, x50 ve x100 büyütmelemlerdeki görüntüleri verilmiştir.

Görüntüler incelendiğinde; ana malzeme tane yapısının literatürde tanımlanan eş taneli östenitik paslanmaz çelik mikroyapısına benzediği anlaşılmaktadır. ITAB ve kaynak metalinin geçiş bölgesi olarak görülen ve ortada verilen resimler incelendiğinde ITAB’da ısının etkisiyle ana malzemeye oranla daha iri tanelerin oluştuğu fotoğraflardan anlaşılmaktadır. Kaynak metali mikroyapısının ise dendritik ve sütunsal tanelerden oluştuğu görülmektedir. Düşük güç (1300 W) kullanılarak yapılan lazer kaynak işleminde diğer numunelerden (2 ve 3 numaralı) daha iri tanelerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durumun uygulanan ısı ve soğuma süresine bağlı olarak değişim gösterdiği düşünülmektedir.



Şekil 7.2 1 numaralı deneye ait numunenin optik mikroskop görüntüleri

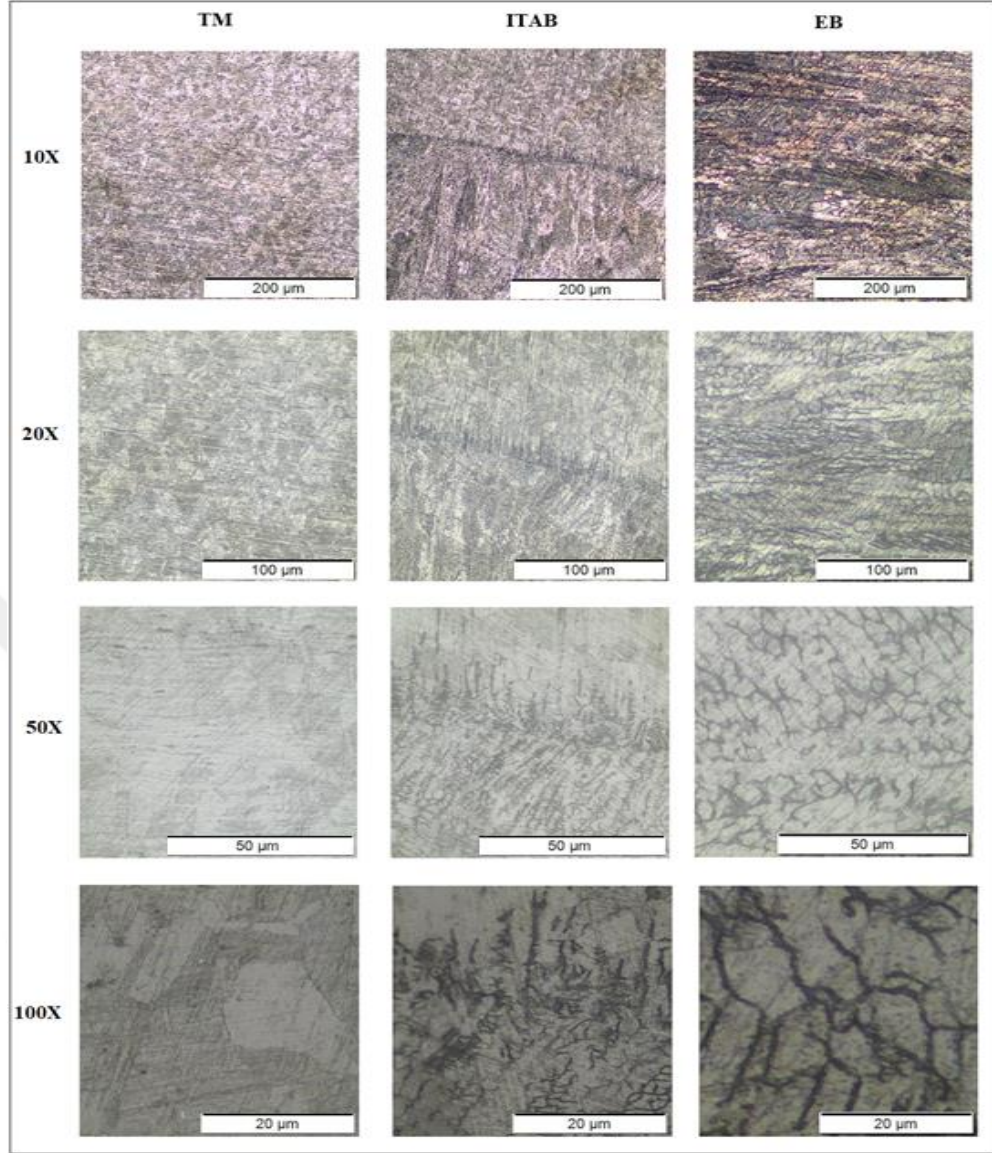
Şekil 7.3'te 1500 W kaynak gücünde, 20 mm/sn kaynak ilerleme hızında ve 2 Bar gaz basıncında lazer kaynağıyla kaynak işlemi yapılan 2 no'lu numunenin, TM, ITAB, EB bölgelerindeki x10, x20, x50 ve x100 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.3 2 numaralı deneye ait numunenin optik mikroskop görüntüleri

Görüntüler incelendiğinde; 1 nolu numunedeki görüntülere benzer görüntüler elde edilirken, güce bağlı olarak tanelerin biraz daha inceldiği gözlemlenmiştir. Fotoğraflarda ITAB ve kaynak metali geçiş bölgesi birbirinden net bir şekilde ayrılırken, ITAB'daki yapıların diğer bölgelere göre iri olduğu, kaynak metalinde ise dendritik tanelerin varlığı dikkat çekmektedir.

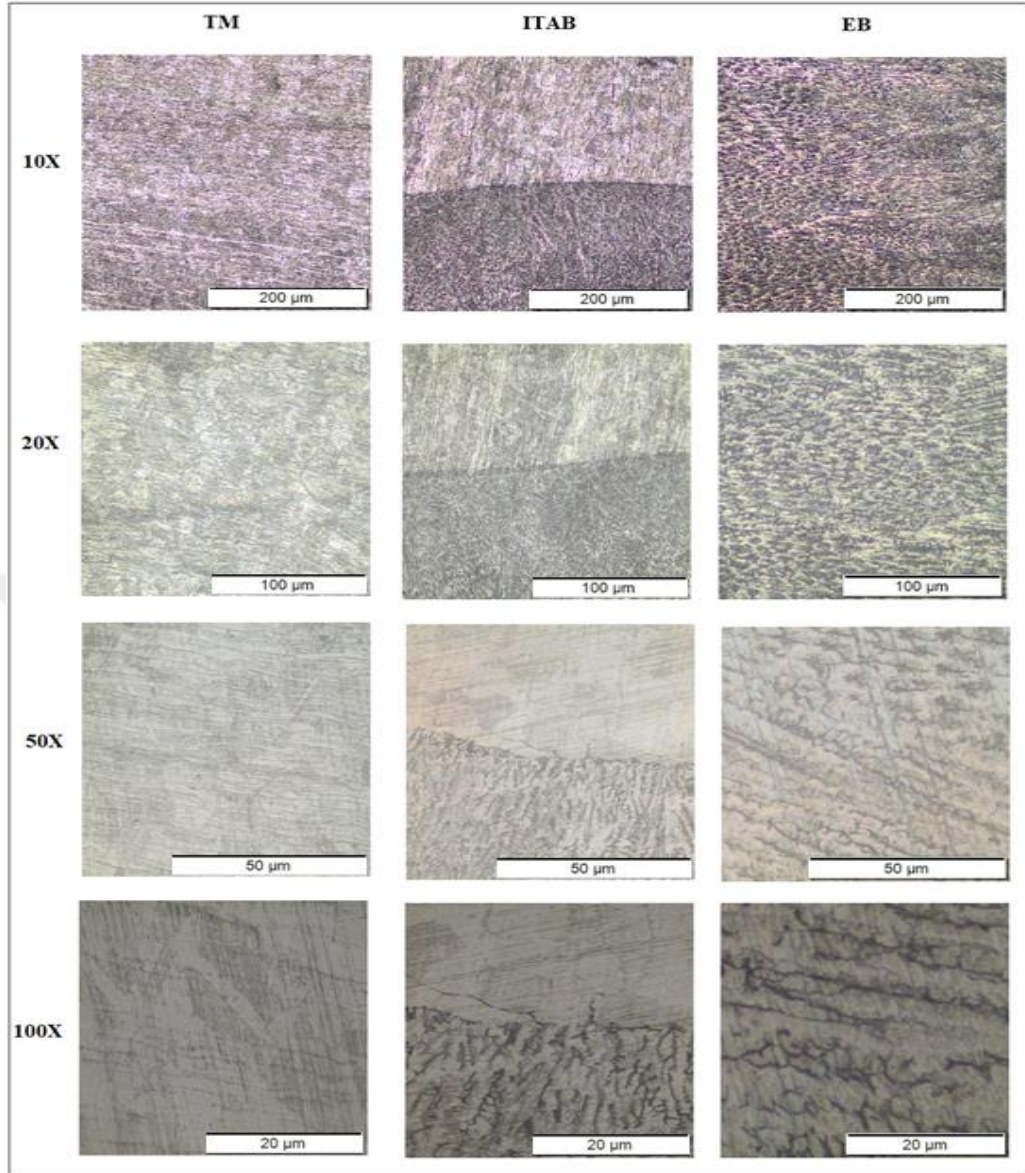
Şekil 7.4'te 1700 W kaynak gücünde, lazer kaynak işlemi yapılan 3 no'lu numunenin, TM, ITAB, EB bölgelerindeki x10, x20, x50 ve x100 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.4 3 numaralı deneye ait numunenin optik mikroskop görüntüleri

Görüntüler incelendiğinde; diğer fotoğrafların benzeri görüntüler elde edildiği görülmektedir. Ortadaki resimlerde ITAB ve kaynak metali geçiş bölgeleri net bir şekilde birbirinden ayrılırken, tanelerin diğer numunelere göre daha ince bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Burada yine uygulanan gücün (1700 W) etkili olduğu görülmektedir. Isıya ve soğuma süresine bağlı olarak tanelerin daha ince olduğu düşünülmektedir.

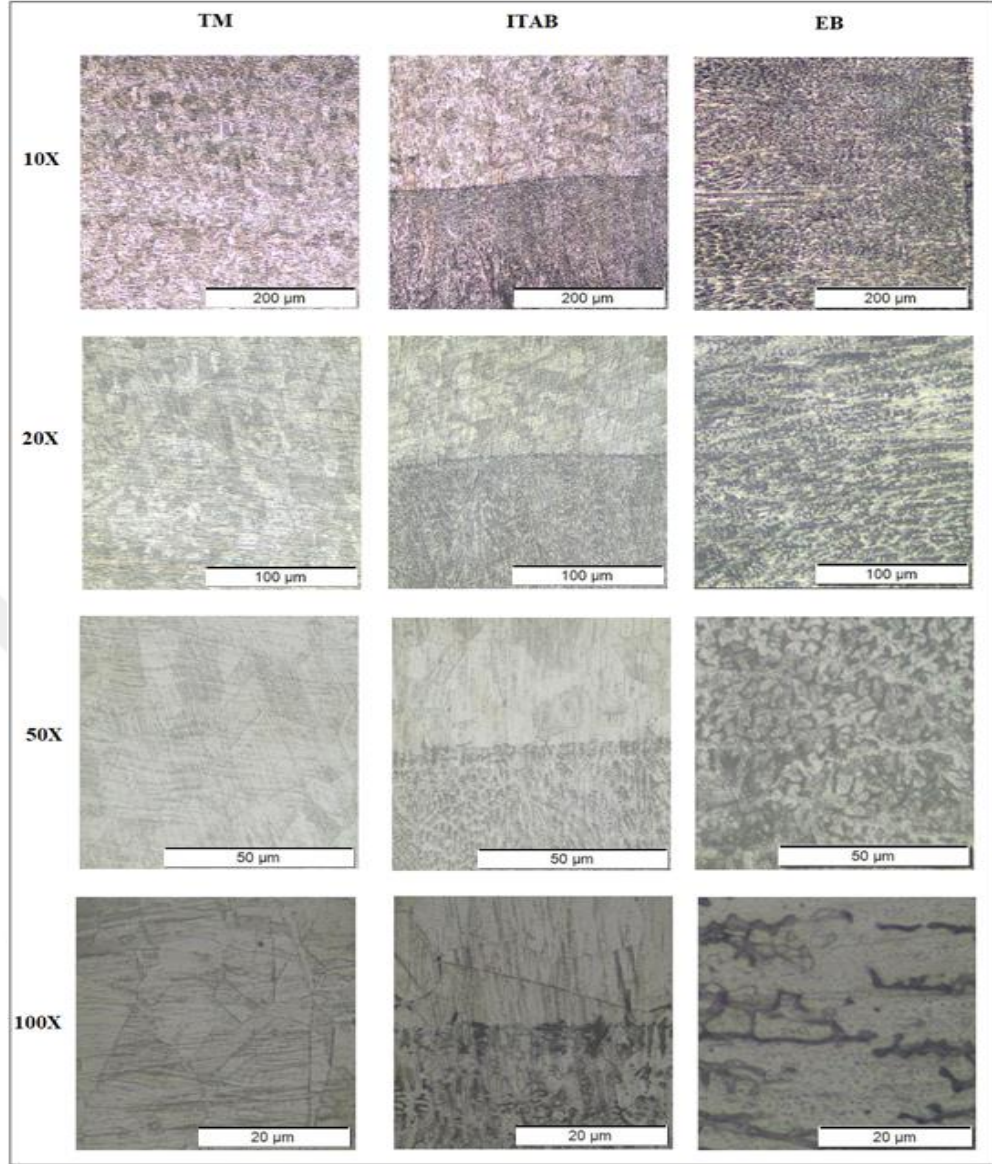
Şekil 7.5'te optimum olarak belirlenen 1500 W kaynak gücünde, lazer kaynak işlemi yapılan, sonrasında nitrasyon işlemi uygulanan 4 no'lu numunenin, TM, ITAB, EB bölgelerindeki x10, x20, x50 ve x100 büyütmelelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.5 4 numaralı deneye ait numunenin optik mikroskop görüntüleri

Görüntüler incelendiğinde; nitrasyon işleminin mikroyapıda oluşturduğu farklılıklar göze çarpmaktadır. Bu farklılıkların nitrasyon işlemi ile yapıda oluşan tabakalar nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Görüntülerde farklılıklar görülmekle birlikte kaynak işlemlerinde optimum kaynak parametresi ile işlem yapılan 4 no'lu numunenin kaynak sonrası mikroyapı incelemelerinde nitrasyon işleminin kaynak üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığını belirtebiliriz.

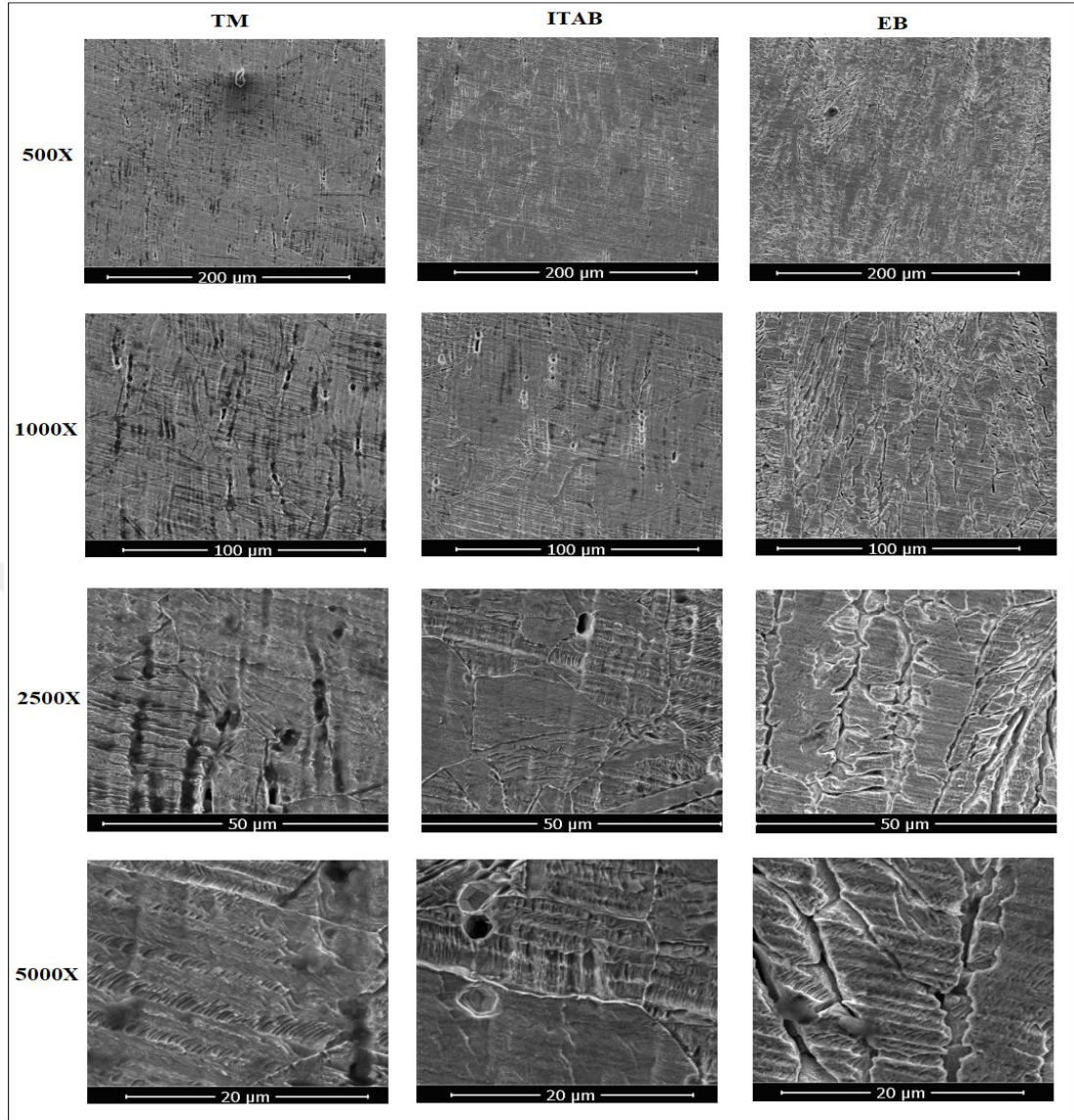
Şekil 7.6'da önce nitrasyon işlemi uygulanan, sonrasında 1500 W kaynak gücünde, lazer kaynak işlemi yapılan 5 no'lu numunenin, TM, ITAB, EB bölgelerindeki x10, x20, x50 ve x100 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.6 5 numaralı deneye ait numunenin optik mikroskop görüntüleri

Görüntüler incelendiğinde; 4 nolu numuneye benzer görüntülerin olduğu gözlemlenmiştir. ITAB ve kaynak metali birbirinden net bir şekilde ayrılırken kaynak metalinde yine dendritik yapıların olduğu görülmüştür. Kaynak işlemlerinde optimum kaynak parametresi ile kaynak işlemi yapılan 5 no’lu numunenin nitrasyon işlemi sonrası lazer kaynak işleminin yapılmasının kaynak üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığını belirtebiliriz.

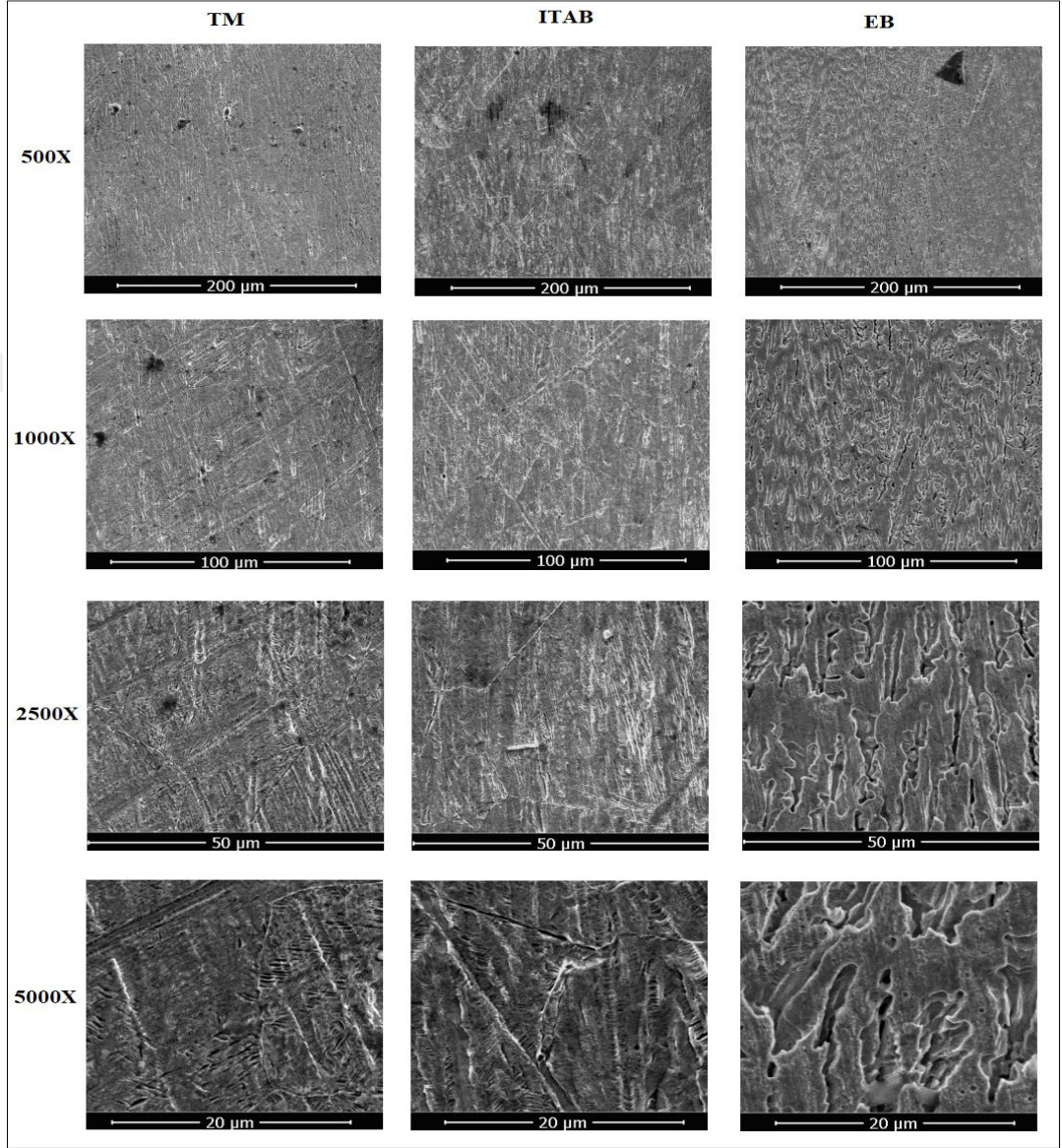
Şekil 7.6 – Şekil 7.11 arasında daha önce mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilen numunelere sırasıyla SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.7 1 numaralı deneye ait numunenin SEM görüntüleri

Şekil 7.7’de 1300 W kaynak gücünde, kaynak işlemi yapılan 1 no’lu numunenin, TM, ITAB, EB bölgelerindeki x500, x1000, x2500 ve x5000 büyütmelelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; ana malzeme mikroyapılarının orijinal malzeme mikroyapısına benzediği ve tane ebatlarının kaynak öncesi morfolojilerini genel olarak koruduğu görülmüştür. Kaynak metalinin dentritik yapıda olduğu SEM fotoğraflarından çok net anlaşılmaktadır. Kaynak dikişindeki tanelerin yine merkeze doğru yönlendiği anlaşılmaktadır. ITAB’ın yine dar bir bölgede olduğu tespit edilmiştir. Kaynak gücü optimum kaynak gücü olan 1500 W’tan düşük tutulmasına rağmen, herhangi olumsuz bir mikroyapı görüntüsüne rastlanılmamıştır.

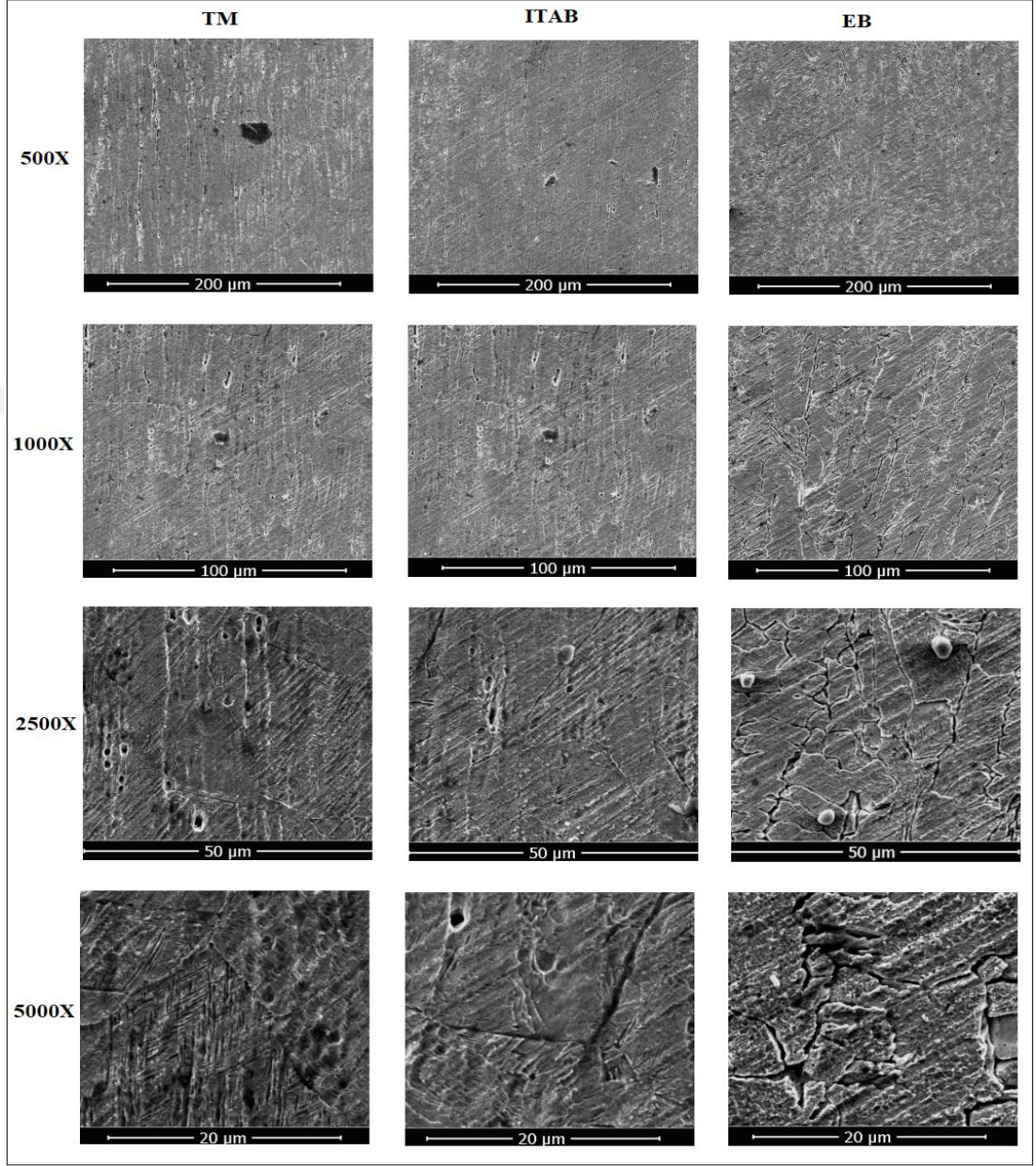
Şekil 7.8’de 1500 W kaynak gücünde, kaynak işlemi yapılan 2 no’lu numunenin, TM, ITAB, EB bölgelerindeki x500, x1000, x2500 ve x5000 büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.8 2 numaralı deneye ait numunenin SEM görüntüleri

Görüntüler incelendiğinde; kaynak işlemi sonrasında ana malzeme mikroyapılarının orijinal malzeme mikroyapısına benzediği ve tane ebatlarının kaynak öncesi morfolojilerini genel olarak koruduğu görülmüştür. Ana malzemedeki kaynak dikişinin dentritik yapıda olduğu görülmüştür. Kaynak dikişindeki tanelerin ise merkeze doğru yönlendiği anlaşılmaktadır. Ana malzemedan kaynak dikişi tarafına doğru ısının etkili olduğu geçiş bölgesinin de (ITAB) dar olduğu tespit edilmiştir.

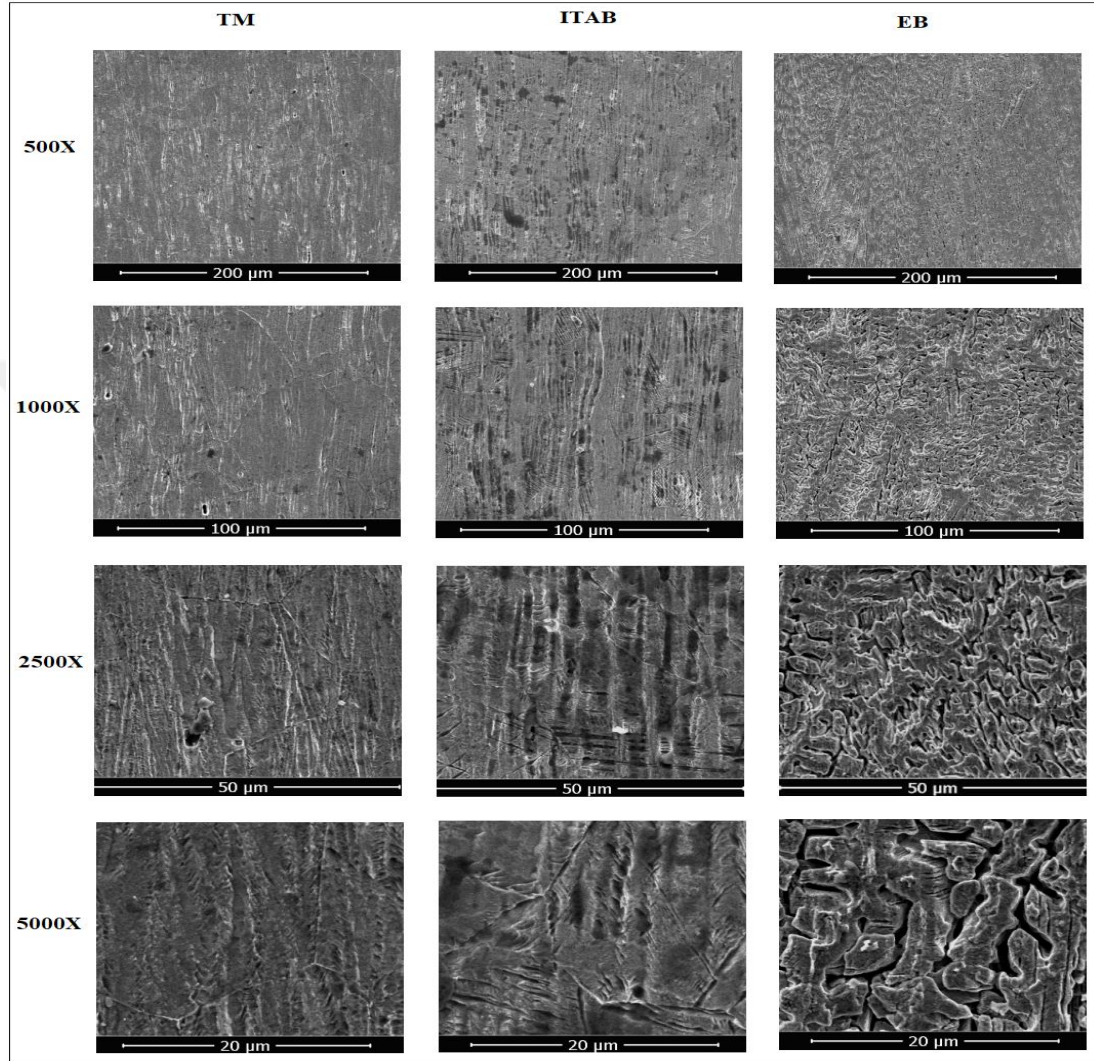
Şekil 7.9’da 1700 W kaynak gücünde, kaynak işlemi yapılan 3 no’lu numunenin, SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.9 3 numaralı deneye ait numunenin SEM görüntüleri

Görüntüler incelendiğinde; mikroyapıların diğer numunelerdeki mikroyapılara benzediği anlaşılmaktadır. Kaynak metalinin dentritik yapıda olduğu, kaynak dikişindeki tanelerin ise merkeze doğru yönlendiği anlaşılmaktadır. Ana malzemedan kaynak dikişi tarafına doğru ITAB’ın dar bir bölgede oluştuğu da tespit edilmiştir.

Şekil 7.10'da 1500 W kaynak gücünde, kaynak işlemi yapılan, sonrasında nitrasyon işlemi uygulanan 4 no'lu numunenin, TM, ITAB, EB bölgelerindeki x500, x1000, x2500 ve x5000 büyütmelelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir.

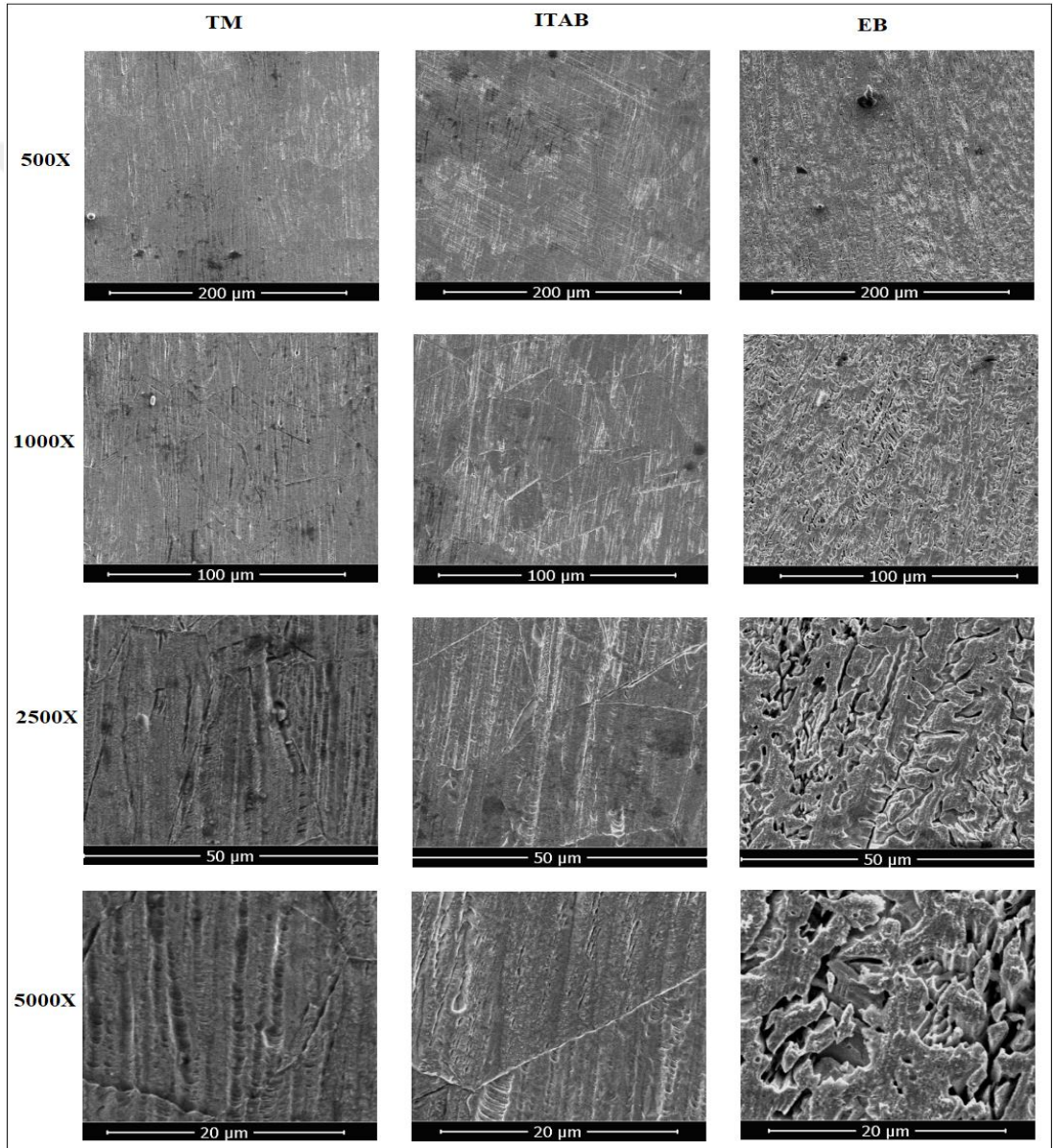


Şekil 7.10 4 numaralı deneye ait numunenin SEM görüntüleri

Görüntüler incelendiğinde; diğer fotoğraflardaki benzer yapılar burada da rastlanılmıştır. Kaynak işlemi gerçekleştirilen numunelerdeki ana malzeme mikroyapılarının orijinal malzeme mikroyapısına benzediği ve tane ebatlarının kaynak öncesi morfolojilerini yaklaşık olarak koruduğu görülmüştür. Kaynak metalinin dentritik yapıda olduğu, tanelerin ise merkeze doğru yönlendiği anlaşılmıştır. Ana malzemeden kaynak dikişi tarafına doğru ITAB bölgesinin de dar olduğu tespit edilmiştir. Kaynak işlemlerinde optimum kaynak parametresi ile kaynak işlemi

yapılan 4 no'lu numunenin SEM görüntülerinde kaynak sonrası nitrasyon işleminin kaynak üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığını da görüntülerden belirtebiliriz.

Şekil 7.11'de önce nitrasyon işlemi uygulanan, sonrasında 1500 W kaynak gücünde, lazer kaynağıyla kaynak işlemi yapılan 5 no'lu numunenin, TM, ITAB, EB bölgelerindeki x500, x1000, x2500 ve x5000 büyütmelelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir.



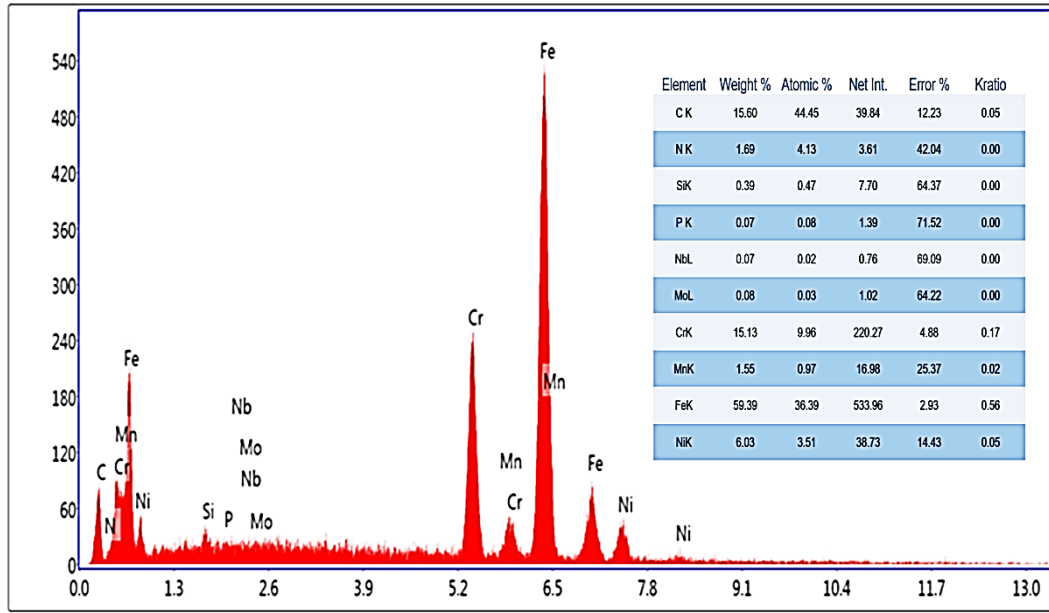
Şekil 7.11 5 numaralı deneye ait numunenin SEM görüntüleri

Görüntüler incelendiğinde; diğer fotoğraflara benzer görüntüler elde edilmiştir. Kaynak işlemi sonrasında ana malzeme mikroyapısının, orijinal malzeme mikroyapı

özellik ve morfolojisini koruduğu kaynak metalinde ise dendritik tanelerin varlığı gözlemlenmiştir. Kaynak metalinde taneler kaynak merkezine doğru yönelmektedir. ITAB yine dar bir alanda oluşmuştur. Kaynak işlemlerinde nitrasyon işlemi sonrası optimum kaynak parametresi ile kaynak işlemi yapılan 5 no'lu numunede kaynak üzerinde olumsuz bir etkinin olmadığı söylenilebilir.

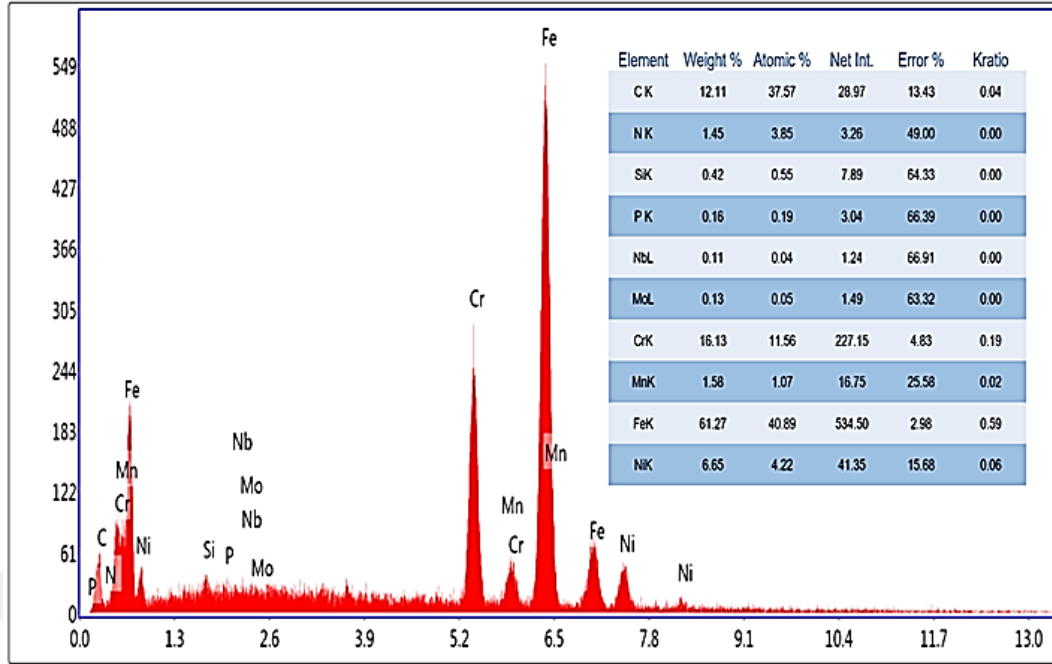
7.1.3 EDS İnceleme Bulguları

Ergime bölgelerinden alınan EDS ölçümleri sonucunda elde edilen grafikler Şekil 7.12 – Şekil 7.16 arasında verilmiştir. Yine bu grafiklere ait sayısal veriler de şekillerin içinde verilmiştir. EDS incelemelerinde özellikle Azot elementinin değerlerinin 5 numunede de birbirine yakın değerler olduğu görülmektedir.



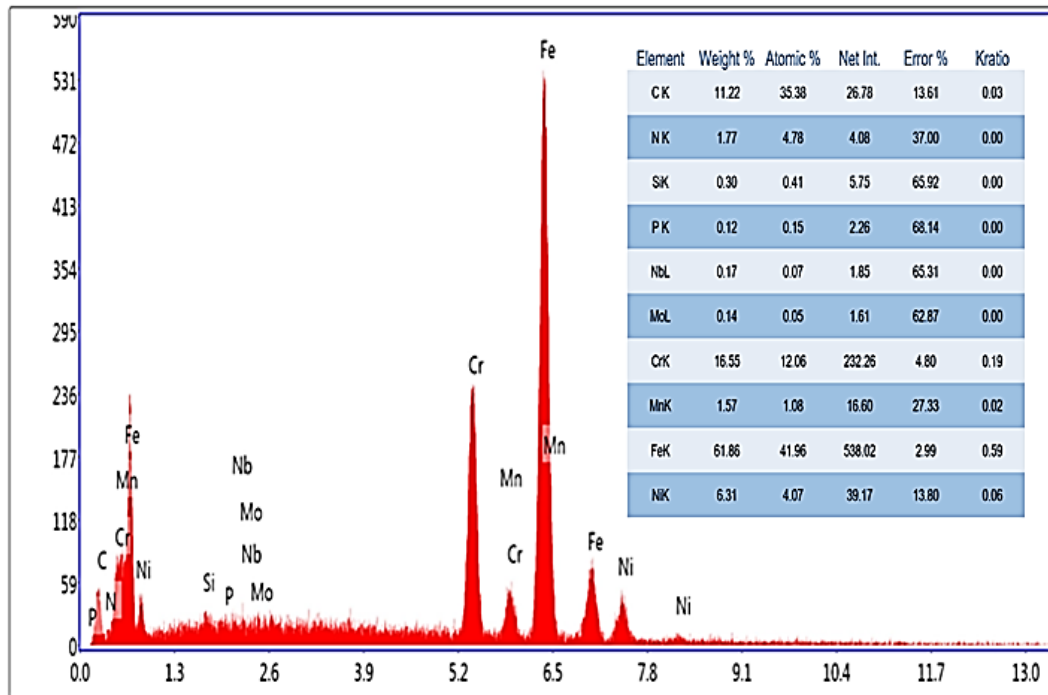
Şekil 7.12 Numune 1'e ait EDS grafiği

Şekil 7.12'de 1300 W kaynak gücünde, lazer kaynağıyla kaynak işlemi yapılan 1 no'lu numunenin EB bölgesindeki EDS ölçüm sonucunda verilmiştir. Ölçüm sonuçlarında elde edilen piklerin tipik östenitik paslanmaz çelik piklerine benzer şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir.



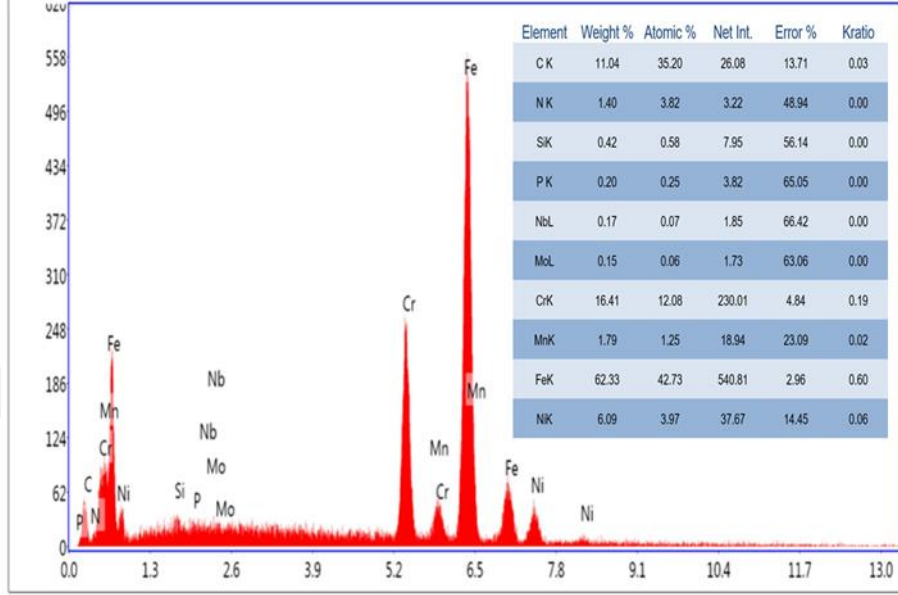
Şekil 7.13 Numune 2'ye ait EDS grafiği

Şekil 7.13'te 1500 W kaynak gücünde, azer kaynağıyla kaynak işlemi yapılan en uygun kaynak gücü ile birleştirilen 2 no'lu numunenin EB bölgesindeki EDS ölçüm sonucunda verilmiştir. Grafik ve tablo incelendiğinde tipik AISI 304L tipi östenitik paslanmaz çelik pik ve içeriğinin oluştuğu gözlemlenmiştir.



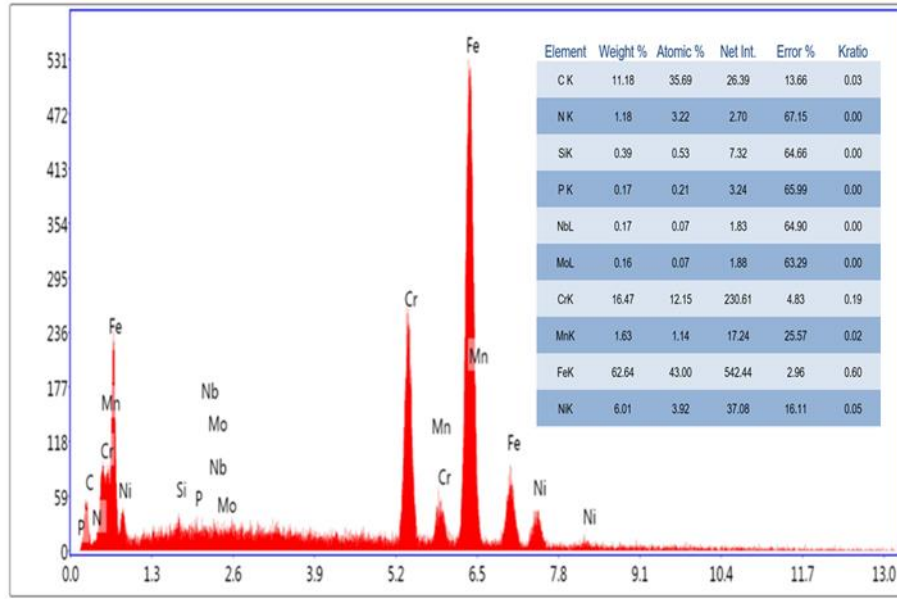
Şekil 7.14 Numune 3'e ait EDS grafiği

Şekil 7.14'te 1700 W kaynak gücünde, 20 mm/sn kaynak ilerleme hızında ve 2 Bar gaz basıncında lazer kaynağıyla kaynak işlemi yapılan 3 no'lu numunenin EB bölgesindeki EDS ölçüm sonucu verilmiştir. Grafik ve tablo incelendiğinde; 1 ve 2 no'lu numunelerde edilen grafiklere benzer bir grafik elde edildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 7.15 Numune 4'e ait EDS grafiği

Şekil 7.15'te 1500 W kaynak gücünde, kaynak işlemi yapılan, sonrasında nitrasyon işlemi uygulanan 4 no'lu numunenin EB bölgesindeki EDS ölçüm sonucu verilmiştir. Grafik ve tablo incelendiğinde; Azot elementi kütleli olarak %1,40 oranında görülmüştür. Nitrasyon işleminin Azot elementi miktarında kayda değer bir değişim olmadığı tespit edilmiştir. Azot miktarının normal değerlerde kalmasının nedeni, nitrasyon işleminin yüzey sertleştirme işlemi olması, malzemenin yüzey kısmı ile mikron düzeyde etkileşime girmesinden dolayı kaynak bölgesindeki Azot miktarında anormal bir değişim meydana getirmediğini belirtebiliriz.



Şekil 7.16 Numune 5'e ait EDS grafiği

Şekil 7.16'da nitrasyon işlemi sonrasında 1500 W kaynak gücünde, 20 mm/sn kaynak ilerleme hızında ve 2 Bar gaz basıncında lazer kaynağıyla kaynak işlemi yapılan 5 no'lu numunenin EB bölgesindeki EDS ölçüm sonucu verilmiştir. Grafik ve tablo incelendiğinde; Azot elementi kütleli olarak %1,18 oranında görülmüştür. Nitrasyon işleminin Azot elementi miktarında kayda değer bir değişim göstermediği tespit edilmiştir. Azot miktarının normal değerlerde kalmasının nedeni, nitrasyon işleminin yüzey sertleştirme işlemi olması, malzemenin yüzey kısmı ile mikron düzeyde etkileşime girmesi ve kaynak işlemi öncesi nitrasyon yapılan numunelerin kaynak işlemi öncesi zımparalanmasından dolayı olduğunu belirtebiliriz.

7.2 Mekanik Deney Bulguları

7.2.1 Çekme Testi Bulguları

Farklı lazer gücü parametrelerinde lazer kaynak işlemine tabi tutulmuş olan 1, 2 ve 3 no'lu numunelere uygulanan çekme ve eğme testleri sonucunda en iyi sonuçları veren 2 nolu numune lazer gücü açısından "optimum kaynak parametresi" olarak belirlenmiştir. Optimum parametre belirlendikten sonra, bu parametrelerde birleştirme işlemleri uygulanmış kaynaklı birleştirmelerde nitrasyon işleminin etkisini incelemek için 2 birleştirme işlemi daha gerçekleştirilmiştir. 4 no'lu numunenin birleştirme işlemi, 2 numaralı birleştirmede olduğu gibi optimum kaynak parametrelerinde kaynak

işlemine tabi tutulduktan sonra nitrasyon işlemi uygulanmak üzere ısıtıl işlem merkezine gönderilmiştir. 5 no'lu numune ise kaynak işlemi öncesinde nitrasyon işlemi uygulanmış ve sonra 2 numaralı birleştirmenin kaynak parametrelerinde olduğu gibi kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Son aşamada 4 ve 5 no'lu numunelere de çekme testi yapılmıştır. Çekme testi sonrası numunelerin görüntüleri Şekil 7.17'de görülmektedir.

Şekil 7.17'de gösterilen numunelerin, çekme testi sonucunda yapılan analizlerinde kopmaların ITAB bölgesinde meydana geldiği görülmüştür. Mikroyapı analizleri incelendiğinde kaynak metalinin hemen yanında oluşan iri taneli bölgenin mukavemetinin diğer bölgelere göre daha düşük oluşması beklenen bir durumdur ve bu handikap nedeniyle tüm kopmalar kaynak metalinin hemen bitiğinde iri taneli bölgelerde oluşmuştur. Bu durum bütün numunelerin kaynak dikişinin sağlam olduğunu göstermektedir.

Kaynak işlemlerinde ilk 3 deney mukayese edildiğinde 1500 W'lık güçte kaynatılan 2 no'lu numunenin mekanik deneylerde optimum sonuçlar sergilediği tespit edilmiştir. Dolayısı ile optimum güç parametresi olarak kaynak gücü 1500 W olarak belirlenmiştir.



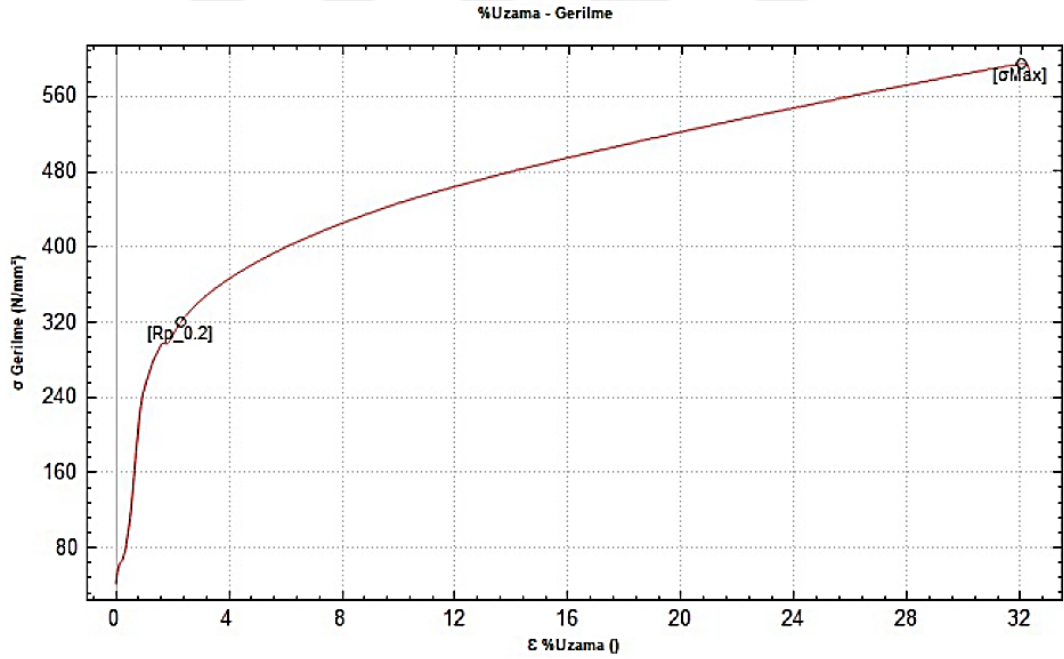
Şekil 7.17 Çekme testi sonrası numuneler

Numunelerin çekme deneyine ait akma dayanımı değerleri, maksimum çekme dayanımı değerleri ve uzama değerleri Tablo 7.1’de verilmiştir. Ölçüm belirsizliklerinin önüne geçmek adına standart sapmalar hesaplanmış olup, akma ve çekme dayanımı için ± 10 MPa mukavemet değeri ve % uzamada ise ± 3 oranında uzama toleranslarında ölçümler gerçekleştirilmiştir.

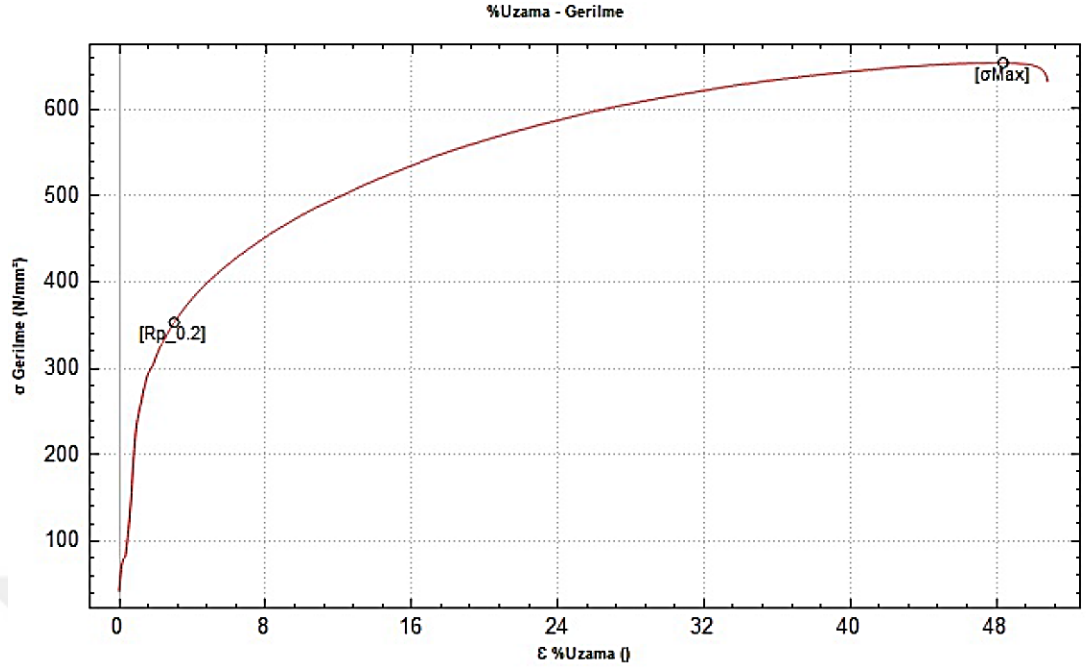
Tablo 7.1 Numunelere ait çekme testi sonuçları

Numuneler	Lazer Gücü (Watt)	Akma Dayanımı (MPa) (± 10)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa) (± 10)	% Uzama (± 3)	Kopma Bölgesi
1. Numune	1300	320,07	594,97	28,75	ITAB (iri taneli bölge)
2. Numune	1500	352,94	653,72	50,62	ITAB (iri taneli bölge)
3. Numune	1700	300,15	536,41	20,01	ITAB (iri taneli bölge)
4. Numune (Önce kaynak, sonra nitrasyon)	1500	344,19	648,13	41,25	ITAB (iri taneli bölge)
5. Numune (Önce nitrasyon, sonra kaynak)	1500	326,95	612,21	25,62	ITAB (iri taneli bölge)
Not: Kaynak İlerleme Hızı 20 mm/sn ve Gaz Basıncı 2 Bar'dır.					

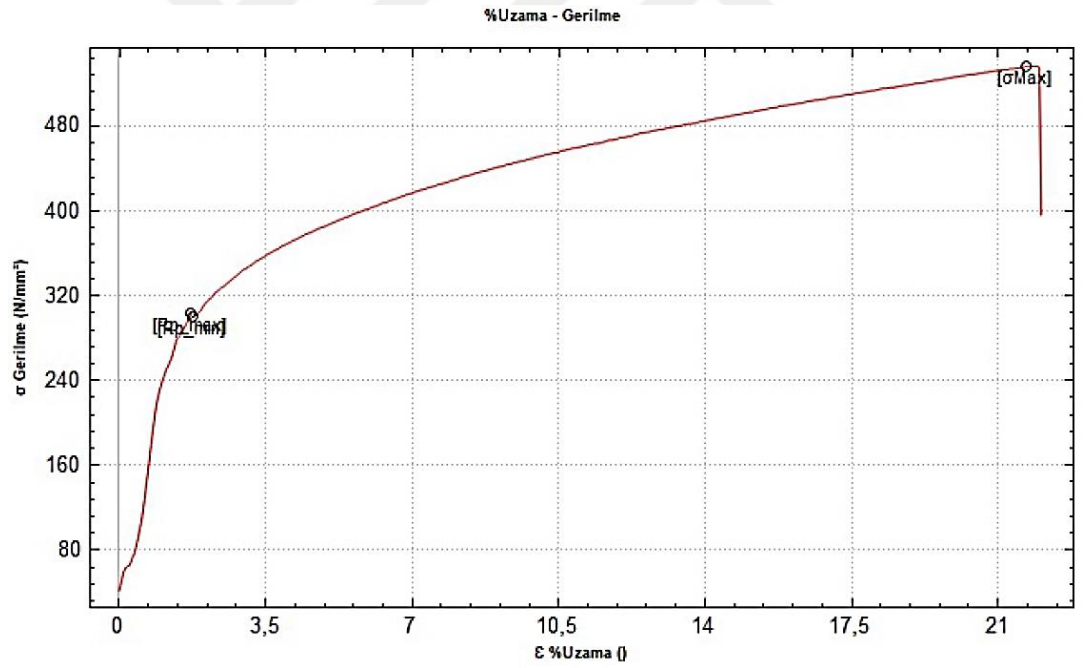
Çekme testi sonrası 5 numuneye ait akma, kopma ve uzama grafikleri Şekil 7.18 – Şekil 7.22 arasında sırasıyla verilmiştir.



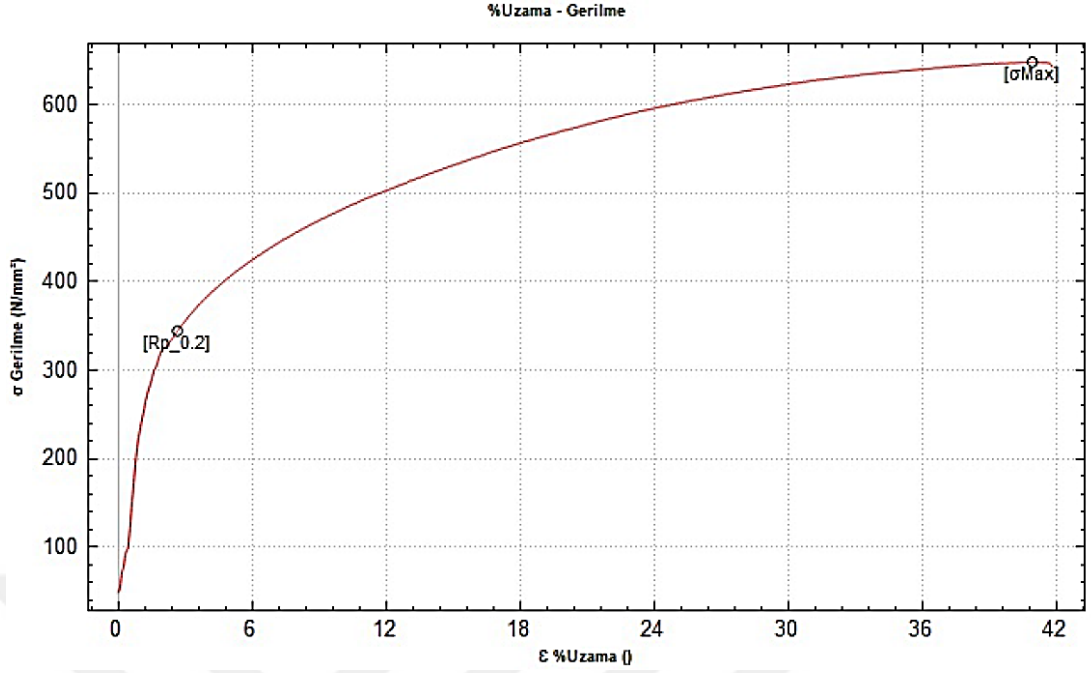
Şekil 7.18 Çekme testi sonrası 1. numuneye ait akma, gerilme / uzama grafiği



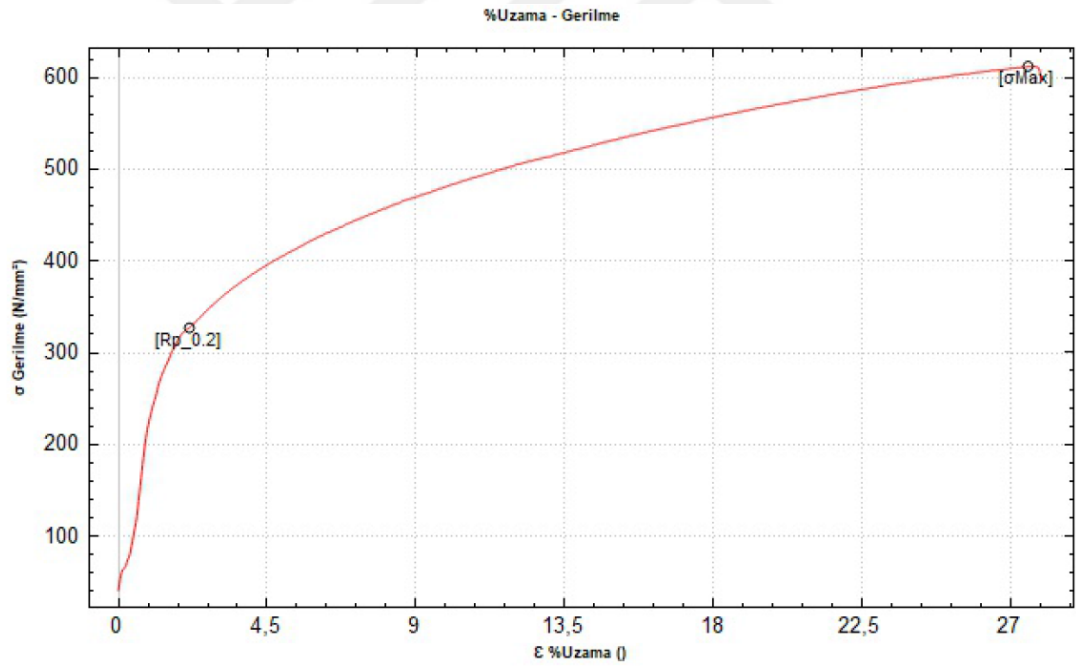
Şekil 7.19 Çekme testi sonrası 2. numuneye ait akma, gerilme / uzama grafiği



Şekil 7.20 Çekme testi sonrası 3. numuneye ait akma, gerilme / uzama grafiği



Şekil 7.21 Çekme testi sonrası 4. numuneye ait akma, gerilme / uzama grafiği



Şekil 7.22 Çekme testi sonrası 5. numuneye ait akma, gerilme / uzama grafiği

Tablo 7.1 ve Şekil 7.18 – Şekil 7.22 arasındaki grafikler incelendiğinde; “optimum kaynak parametresi” olarak belirlen 2 no’lu numuneye ait akma dayanımı değerleri, maksimum çekme dayanımı değerleri ve uzama değerlerinin tüm numuneler içerisinde en iyi sonuçları sergileyerek optimum parametre olarak belirlenmesi kararlaştırılmıştır. Optimum parametrede kaynak ve Nitrasyon işlemleri

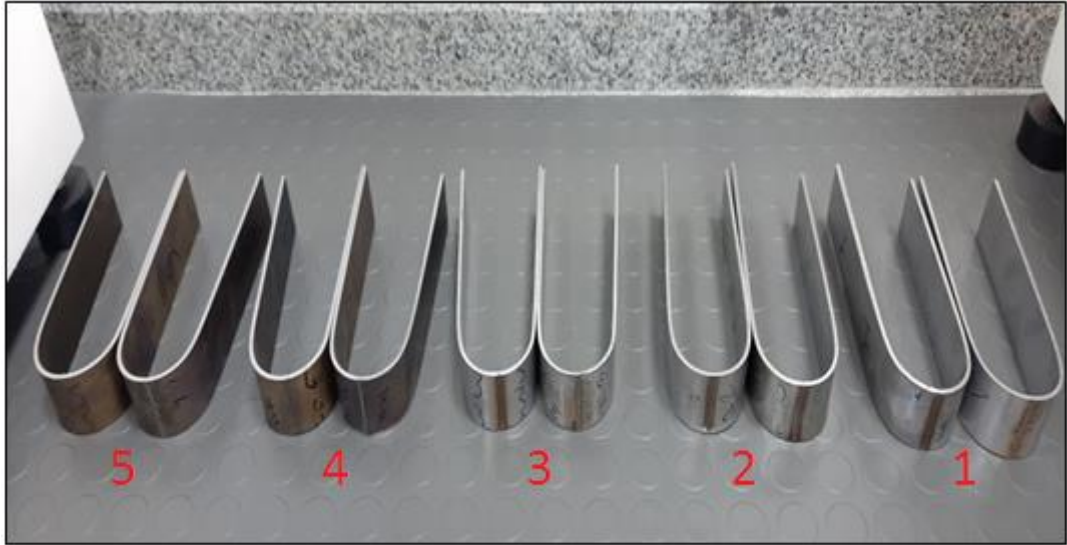
gerçekleştirilen 4 ve 5 numaralı numunelerin dayanım ve uzama değerleri 2 numaraya yakın değerler gösterse de en yüksek sonuçlar 2 numaralı numunede oluşmuştur. Kaynak gücünün ele alındığı ilk 3 numunedeki çekme testi sonuçları birbiriyle mukayese edildiğinde en yüksek sonuç 2 numarada gözlemlenirken (1500 W), 1 numarada (1300 W) ortalama dayanım ve uzama değerleri sergilemiştir. Kaynak gücünün en yüksek seçildiği 3 numaralı numunede (1700 W) ise en düşük dayanım ve yüzde uzama değerleri elde edilmiştir. Optimum olarak belirlenen 1500 W gücündeki deney ile (2) nitrasyon işleminin uygulandığı 4 ve 5 numaralı deneyler birbiri içerisinde mukayese edildiğinde ise işlem uygulanmayan 2 numaralı numunede en yüksek dayanım ve uzama değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Önce kaynak sonra nitrasyon işlemi uygulanan 4 no'lu numunede 2 numaralı deneye çok yakın dayanım ve uzama değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Bu durum kaynak işlemi sonrasında uygulanan nitrasyon işleminin dayanım ve uzama değerlerinde belirleyici bir etkiye sahip olmadığını ortaya koymaktadır. Önce nitrasyon, sonrasında kaynak işlemi gerçekleştirilen 5 no'lu numunede ise 2 no'lu deneyden bir hayli düşük dayanım ve uzama değerleri elde edilmiştir. Buradan kaynak işlemi öncesinde uygulanan Nitrasyon işleminin mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılabilir. Ayrıca nitrasyon işlemi ile yüzeye azot uygulaması yapılmasının kaynak işleminde “Azot kırılgenliği” adı verilen olumsuz bir durumu tetikleyebileceği ve bu durumun da mekanik özellikleri olumsuz etkileyeceği literatür incelemelerinden bilinmektedir. Bu durum bilinmesine rağmen bu tez çalışmasında bu konuda uygulama yapılmasının nedeni ise tamir bakım kaynak uygulamaları gibi ekstra durumların varlığı nedeniyledir. Bu nedenle, en düşük sonucun önce nitrasyon işlemi, sonra kaynak işlemi uygulanan numunede yaklaşık en düşük mekanik sonuçların oluşması tez çalışmasında beklenen bir durumdur.

Sonuç olarak, nitrasyon işlemi görmüş 4 ve 5 no'lu numunelerin, nitrasyon işlemi görmemiş 2 no'lu numuneye kıyasla çekme testi sonucu oluşan akma dayanımı değerleri, maksimum çekme dayanımı değerleri ve uzama değerleri bakımından daha düşük değerlerle sonuçlandığı görülmüştür. Yine nitrasyon işlemi uygulanmış 4 ve 5 no'lu numunelerden, önce nitrasyon işlemi görmüş sonrasında kaynak işlemi yapılmış 5 no'lu numunenin, önce kaynak işlemi görmüş sonra nitrasyon yapılmış 4 no'lu numuneye kıyasla çekme testi sonucu oluşan akma dayanımı değerleri, maksimum

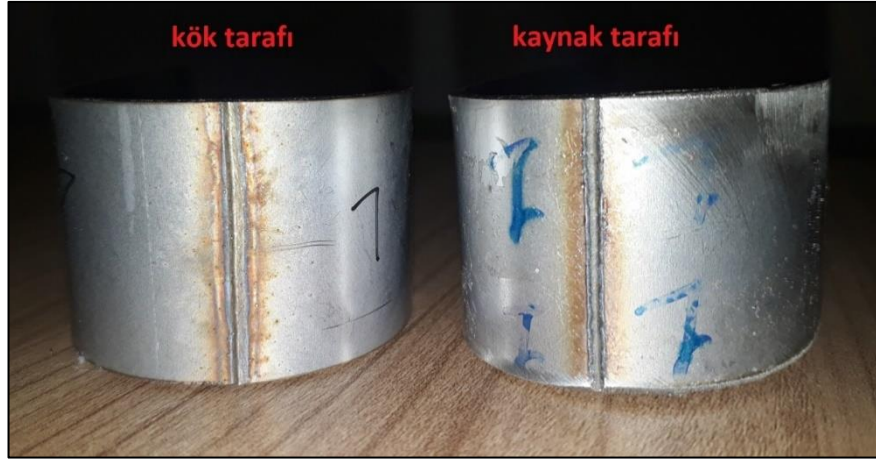
çekme dayanımı değerleri ve uzama değerleri bakımından daha düşük değerlerle sonuçlandığı görülmüştür. 4 no'lu numunenin çekme testi sonucu oluşan akma dayanımı değerleri, maksimum çekme dayanımı değerleri ve uzama değerleri 2 no'lu numuneye daha yakın değerlere sahip olduğu ancak 5 no'lu numunenin akma dayanımı değerleri, maksimum çekme dayanımı değerleri ve uzama değerleri ile 2 no'lu numunenin değerleri arasında belirgin bir fark olduğu sonucuna varılmıştır.

7.2.2 Eğme Testi Bulguları

Nitrasyon işlemi görmemiş farklı güç parametrelerinde kaynak işlemi yapılan 1,2 ve 3 no'lu numuneler ile nitrasyon işlemi görmüş ve optimum parametrede (2 nolu deney) birleştirilmiş 4 ve 5 no'lu numuneler için kaynak tarafı ve kök tarafı olmak üzere 2'şer adet eğme testi yapılmıştır. Eğme testi sonrası numunelerin görüntüsü Şekil 7.23 – Şekil 7.29 arasında görülmektedir.



Şekil 7.23 Eğme testi sonrası numuneler



Şekil 7.24 Eğme testi sonrası 1. numuneye ait görsel



Şekil 7.25 Eğme testi sonrası 2. numuneye ait görsel



Şekil 7.26 Eğme testi sonrası 3. numuneye ait görsel



Şekil 7.27 Eğme testi sonrası 4. numuneye ait görsel



Şekil 7.28 Eğme testi sonrası 5. numuneye ait görsel

Şekil 7.23 – Şekil 7.28 arasında eğme testi sonrası kaynak tarafı ve kök tarafı resimleri görülen numunelerinin gözle muayenesi yapılmış olup, kaynak bölgesinde çatlama, kırılma, kopma vb. türden olumsuzluk teşkil eden bir durumun bulunmadığı sonucuna varılmıştır. Buradan kaynak bölgesinin numunenin sünekliğine tesir edecek herhangi bir olumsuzluk içermediği, kaynak bölgesinin ana malzemeye benzer bir süneklik özelliği sergilediği anlaşılmaktadır.

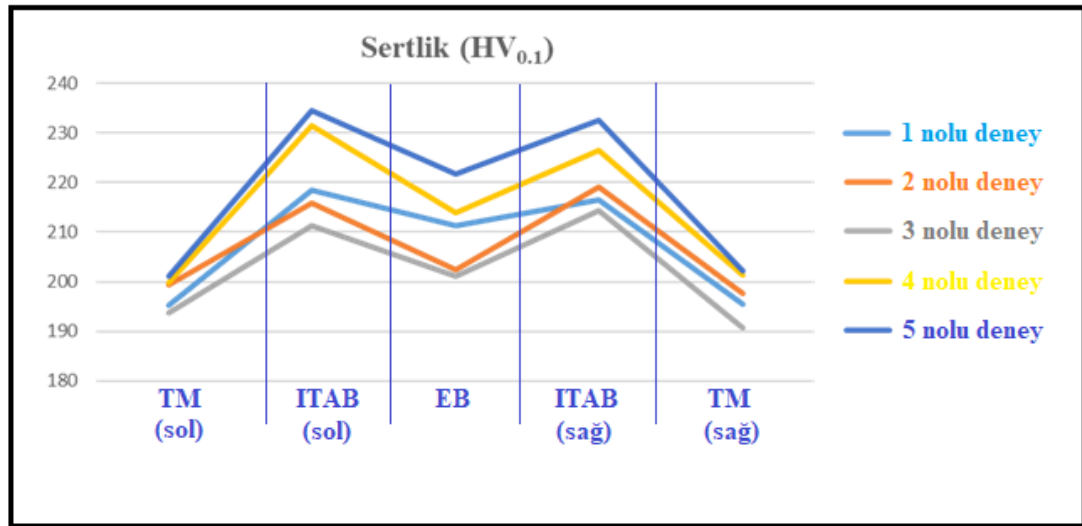
7.2.3 Vickers Mikrosertlik Deney Bulguları

Nitrasyon işlemi görmemiş farklı güç parametrelerinde kaynak işlemi yapılan 1,2 ve 3 no'lu numuneler ile nitrasyon işlemi görmüş ve optimum parametrelerde birleştirilmiş 4 ve 5 no'lu numuneler için TM, ITAB, EB bölgelerinden alınmış 5'er adet mikrosertlik ölçümlerinin ortalaması “HV” cinsinden Tablo 7.2’de ve Şekil 7.29’daki

grafikte belirtilmiştir. Ölçümlere standart sapma uygulanmış olup, sapma miktarı 5 HV'dir.

Tablo 7.2 Sertlik testi sonuçları

Numuneler	Sertlik HV _{0.1} (± 5 HV)				
	TM (sol)	ITAB (sol)	EB	ITAB (sağ)	TM (sağ)
1. numune	195,2	218,5	211,2	216,4	195,5
2. numune	199,3	215,8	202,5	219,2	197,7
3. numune	193,7	211,2	201,2	214,3	190,7
4. numune	199,9	231,4	213,8	226,5	201,3
5. numune	201,1	234,5	221,7	232,5	202,2



Şekil 7.29 Sertlik testi sonuçlarına ait grafik

Tablo 7.2'deki sertlik testi sonuçları ve bu sonuçlarla oluşturulan Şekil 7.29'daki grafik incelendiğinde; grafikteki en belirgin özelliğin merkezden itibaren her iki yöne simetrik olmasıdır. Burada kaynak esnasında kullanılan kaynak gücü hariç sabit parametrelerin sıkı bir şekilde kontrol edilmesi, kaynak esnasında doğru fikstürleme ve otomatik kaynağın yanı sıra ilave metal kullanılmaması gibi etkenler grafiklerin benzer ve hatalardan uzak olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Grafikler incelendiğinde en yüksek sertlik değerlerinin ergime sınırına bitişik ITAB'ın iri taneli bölgesinden ölçüldüğü, kaynak metali sertliklerinin ise bu bölge sertliklerine nispeten yakın olduğu görülmektedir. Yine sertlik sonuçları ve grafiklerden Nitrasyon

işlemi yapılarak birleştirilen 4 ve 5 numaralı numunelerin kaynak metali ve ITAB'daki sertlik değerlerinin, nitrasyon işlemine tabi tutulmadan birleştirilen 1, 2 ve 3 no'lu numunelerden daha yüksek olduğu ayrıca tespit edilmiştir. Numunelerin genelinde, kaynak bölgesinde ve ITAB'daki sertlik değerleri ana metalin sertlik değerlerinden fazla çıkmıştır. ITAB'daki sertlik değerleri ise kaynak metalinden bir miktar daha yüksektir.



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

AISI 304L östenitik paslanmaz çeliklerin lazer kaynağı uygulamalarının yüzey sertleştirme işleminin kaynaklanabilirliğe etkilerinin incelendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmiştir.

8.1 Sonuçlar

1. Nitrasyon işlemi yapılmış AISI 304L östenitik paslanmaz çeliklere lazer kaynak işlemi uygulanabilmiştir.
2. Numunelerin SEM ve optik mikroskop incelemeleri sonucunda ana malzemenin tipik östenitik paslanmaz çelik mikroyapısında, kaynak metalinin ise dentritik yapıda olduğu, kaynak metalindeki tane yapılarının merkeze doğru yönelmiş olduğu, ITAB'ın dar bir bölgede olduğu görülmüştür.
3. EDS incelemelerinde özellikle Azot elementinin değerlerinin 5 numunede de birbirine yakın değerler olduğu tespit edilmiştir.
4. 1300 - 1500 - 1700 Watt olmak üzere 3 farklı güç parametresinde lazer kaynağı ile birleştirilen numunelere yapılan çekme testi sonuçlarında en uygun akma dayanımı, maksimum çekme dayanımı ve uzama miktarını veren optimum birleştirme 1500 Watt güç ile birleştirilen 2. Numune olarak belirlenmiştir.
5. Akma dayanımı, maksimum çekme dayanımı ve uzama miktarları baz alındığında optimum parametrede birleştirilen ve sonrasında nitrasyon işlemi uygulanan 4 nolu numunede, nitrasyon işlemi uygulanmayan 2 nolu numuneye göre bir miktar düşüş, önce nitrasyon sonra kaynak işlemi gerçekleştirilen 5 nolu numunede ise 2 nolu numuneye göre daha yüksek bir düşüş gözlemlenmiştir.
6. Nitrasyon işlemi yapıldıktan sonra en uygun 1500 Watt güç parametresinde kaynak işlemi yapılan 5. numunenin, önce kaynak sonra nitrasyon işlemi uygulanan 4.

numuneye göre akma dayanımı, maksimum çekme dayanımı ve uzama miktarında belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir.

7. Çekme testi sonucunda yapılan analizlerde, kopmaların ITAB bölgesinden meydana geldiği görülmüştür. Bu durumda bütün numunelerin kaynak dikişinin sağlam olduğu sonucuna varılmıştır.
8. Sertlik testi sonuçlarına bakıldığında nitrasyon işlemi yapılarak birleştirilen 4 ve 5 no'lu numunelerin, ITAB ve kaynak metalindeki sertlik değerinin nitrasyon işlemine tabi tutulmadan birleştirilen 1,2 ve 3 no'lu numunelerden daha fazla çıktığı tespit edilmiştir. Bu da nitrasyon işleminin sertliği artırmada etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.
9. Numunelerin genelinde, ITAB ve kaynak metalindeki sertlik değerleri esas metalin sertlik değerlerinden fazla çıkmıştır. ITAB'daki sertliğin kaynak metalinden bir miktar daha fazla olduğu görülmüştür.
10. Tüm numunelerin eğme testlerinde kep ve kök tarafının gözle muayenesi yapılmış olup, kaynak bölgesinde çatlama, kırılma, kopma vb. türden olumsuzluk teşkil eden herhangi bir durum bulunmadığı sonucuna varılmıştır. Bu da kaynak nüfuziyetinin yeterli olduğunu gösteren bir sonuçtur.

8.2 Öneriler

1. Farklı türden paslanmaz çeliklerin birbirleri ile lazer kaynağı ile birleştirilmesi ve nitrasyon işleminin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin incelenmesi konusunda araştırmalar yapılabilir.
2. Daha ince malzemeler kullanılarak, bu malzemelerin lazer kaynağı ile kaynaklanabilirliği ve sonuçları araştırılabilir.

Bu çalışma diğer kaynak yöntemleriyle karşılaştırılarak desteklenebilir.

KAYNAKLAR

- Abbott, D. H. & Albright C. E. (1994). CO₂ shielding gas effects in laser welding mild steel. *Journal of Laser Applications*, 6: 69-80.
- Akbari, A., Mohammadzadeh, R., Templier, C. & Riviere, J.P., (2010). Effect of the initial microstructure on the plasma nitriding behavior of AISI M2 high speed steel, *Surface&Coatings Technology* 204, 4114-4120.
- Akhtar, S. S. Arif, A. F. M. & Yilbas, B. S., (2010). Evaluation of gas nitriding process with in-process variation of nitriding potential for AISI H13 tool steel, *Int J Adv Manuf Technol*, 47, 687–698.
- Alcock J. A. & Baufeld, B. (2017). Diode laser welding of stainless steel 304L. *Journal of Materials Processing Technology*, 240(9), 138-144.
- Anonim, 304L (1.4307) Paslanmaz 304L Çeliği Kataloğu. Birçelik Paslanmaz Çelik A.Ş. <https://bircelik.com/tr/kategori/304l-1-4307-> (Erişim tarihi: 25.06.2018).
- Anonim. (1990). Asil Çelik A.Ş. Otomat Çelikleri (5. Baskı). Bursa. Asil Çelik Teknik Yayınları, s. 5-6.
- Aran, A. & Temel. (2004) M.A. Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller, Acar Matbaacılık, İstanbul, s. 10-29.
- Arata, Y. (1987). Challenge of Laser Advanced Materials Processing. *Proc. Con. Laser Advanced Materials Processing LAMP'87*, Osaka. May 1987. Japan High Temperature Society, 3-11pp.
- Baruah, M. & Bag, S. (2017). Influence of pulsation in thermo-mechanical analysis on laser micro-welding of Ti6Al4V alloy. *Optics & Laser Technology*, 90(8), 40-51.
- Beersiek, J. (1999). On-line Monitoring of Keyhole Instabilities During Laser Beam Welding, 1st, Ed:Prometec Gmbh, Aerchan, 8-99s.
- Bell, T. (1997). Gaseous and Plasma Nitrocarburizing, ASM International, Materials Park, Ohio.
- Bilen, F. A. (2006). “Hardox 400-AISI 304 çelik çiftlerinin plazma transferli ark kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması”, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Blackburn. (J. 2012). “Laser welding of metals for aerospace and other applications”, *Welding and Joining of Aerospace Materials*, 75-108, Philadelphia, USA.
- C. Hojerslev. (2001). Tool Steel, Riso National Laboratory, Roskilde.
- Clauss, A. R., Bischoff, E., Schacherl, R.E. & Mittemeijer, E. J. (2009).

- Çakır, M. C. (1982). Modern Talaşlı İmal Atın Esasları (2. Baskı), Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, s. 239-242.
- Çalgılı, U., Dikbaş, H. & Taşkın, M. (2010). The effects of high weldings speed on microstructure and mechanical properties of dissimilar components (AISI 430 – AISI 304) welded by CO2 laser beam welding. New World Sciences Academy Technological Applied Sciences, 5(2), 160- 177. 79.
- Çelen, S. (2006). Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantının Dayanım ve Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. (Yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Demirci, H. (2004). A. Mühendislik Malzemeleri, Aktüel Yayınevi, İstanbul, s. 25-26.
- Du, H., Somers, M. A. J. & Agren, J. (2000). Metallurgical and Materials Transactions, Physical Metallurgy and Materials Science, 31, 195-211.
- Duley W. W., Mao Y. L. & Kinsman G. (1991). Laser and Electron Beam, Proceedings Conference, Columbia University, New York, USA, 206 s.
- Ekinci, C. (2011). Düşük Karbonlu Mikro Alaşımlı Çeliklerin Sertlik Ve Mikroyapıları Üzerine Soğuma Hızının Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Fuerschbach P. W. & Eisler, G. R. (2003). Effect of laser spot weld energy and duration on melting and absorption. Science and Technology of Welding and Joining, 7(4), 241-246.
- Gözütok, E. (2009). “Paslanmaz çeliklerin TIG kaynağında argon-hidrojen gaz karışımının kaynaklı birleştirmenin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Höke, G. (2014). Sıvı Azotta Bekletme ve Geleneksel Kriyojenik İşlemlerin SAE 4140 Çeliğin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkilerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi. International, Materials Park, Ohio.
- İpek, R. (1999). Pratik Malzeme Bilgisi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Yayınları, 1.
- Kahraman, F., Kasman, Ş., Kahraman, A. D. & Tunuslu, O. (2017). Östenitik Paslanmaz Çelikler İle Takım Çeliklerinin Birbirleri ile Kaynağında Oluşan Kaynak Bölgesinin İncelenmesi. El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 4(1), 64–71.
- Kahraman, N., Gülenç, B. ve Akça, H. (2002). “Ark kaynak yöntemi ile birleştirilen östenitik paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çeliğin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 17(2):75-85.
- Karaaslan, A., Yumurtacı, S. & Sönmez, N. (2001). Lazer ışını ile birleştirilmiş farklı malzemelerin kaynak dikişlerinde sertlik değişimleri, II Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Sempozyumu, Manisa.

- Kaya Y. & Kahraman N. (2011). Titanyum sacların nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin çekirdek oluşumuna etkisi. *Politeknik Dergisi*, 14(4), 263-270.
- Köse C. & Kaçar, R. (2015). AISI 420 martenzitik paslanmaz çeliğin CO2 lazer ışını kaynak yöntemiyle kaynak kabiliyetinin araştırılması. *New World Sciences Academy Technological Applied Sciences*, 7223(6), 13-27.
- Kumar, P. & Sinha, A. N. (2019). Effect of Average Beam Power on Microstructure and Mechanical Properties of Nd:YAG Laser Welding of 304L and St37 Steel. *World Journal of Engineering*, 16(3), 377–388. doi:10.1108/WJE-08-2018-0270.
- Lampman, S. (1995). Introduction to Surface Hardening of Steels, *ASM Handbook, Heat Treating, Volume. 4*, 607-619.
- Lancaster, J. F. (1986). *The Physics of Welding* 2nd ed, International Institute of Welding, January: 306 s.
- Limmaneevichitr C. & Kou S. (2002). Visualization of Marangoni Convection in Simulated Weld Pool. *Welding Journal* 79: 231pp.
- Metallurgical And Materials Transactions A*. (1923). 40a.
- MKE Normu Özel Nitelikte Çelik Türleri Kataloğu. (1978). MKE Yayınları.
- Kahraman, N. & Gülenç, B. (2020). *Modern Kaynak Teknolojisi*, 4. Baskı, Epa-Mat Basım Yayın Ltd. Şti. Ankara.
- Noaker, P. M. (1993). Lasers Penetrate Fabricating Manufacturing. *Engineering*, October: 33-40 pp.
- Özcan, M. (2003). Değişik malzemelerin işlenmesinde kullanılan Nd:YAG lazerleri için etkin bir güç kaynağının tasarımı ve uygulaması. Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- Özden, H. & Gürsel, K. (2004). “Gemi İnşaatı ve Deniz Yapılarında Lazer Işın İmalat Yöntemlerinin Uygulanması”. *Gemi Mühendisliği ve Sanayimiz Sempozyumu*, İstanbul, 240-251.
- Püskülcü, G. & Koçlular, F. (2009). Lazer kaynak yöntemi ve uygulamaları. *Mühendis ve Makina*, 50 (599): 8-17 s.
- Pye, D. (2003). *Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburising*, ASM
- Shah, A., Kumar, A. & Ramkumar, J. (2018). Analysis of transient thermofluidic behavior of melt pool during spot laser welding of 304 stainlesssteel. *Journal of Materials Processing Technology*, 256(11), 109-120

- Soltani, H. M. & Tayebi, M. (2018). Comparative study of AISI 304L to AISI 316L stainless steels joints by tig and Nd:YAG laser welding. *Journal of Alloys and Compounds*, 767(9), 112-121.
- Stott, F.H. & Jordan, M.P. (2001). The effects of load and substrate hardness on the development and maintenance of wear-protective layers during sliding at elevated temperatures, *Wear* 250, 391-400.
- Sun, J., Yan, Q., Gao, W. & Huang, J. (2015). Investigation of laser welding on butt joints of Al/steel dissimilar materials, *Materials and Design Journal*, 83(8), 120-128.
- Thelning, K.E. (1975). *Steel and its Heat Treatment*, Bofors Handbook, Butterworth Heinemann, 379.
- Tofur M. (2017). Çelik Yapıların Tarihçesi, <https://www.muhendisakademisi.com/celik-yapilarin-tarihcesi/> (Erişim tarihi: 27.06.2018)
- Tokdemir, M., Ünlü, B.S., Yılmaz, S.S. & Meriç, C. (2010). Lazer kaynağı ve uygulamaları. *Makinatek*, 152: 122-128 s.
- Torkamany, M. J., Sabbaghzadeh, J. & Hamed, M. J. (2012). Effect of laser welding mode on the microstructure and mechanical performance of dissimilar laser spot welds between low carbon and austenitic stainless steels. *Materials and Design Journal*, 34(1), 666-672.
- Uzun, R. O. (2010). Lazerle kaynak işleminde kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, GÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Weissbach, W. (2000). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*. (Çev. S. Anık, E. S. Anık, M. Vural). İstanbul, Birsan Yayınevi. 103, s. 230-244.
- Yavuz, H. & Çam, G. (2005). Lazer-ark hibrit kaynak yöntemi. *Mühendis ve Makina*, 46 (543): 14-19 s.
- Yılmaz, R. (2017). “Östenitik paslanmaz çeliklerin lazer kaynağı ile birleştirilmesi ve mekanik özellikleri”, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(3):598-605.