

**LAZERLE KAYNAK İŞLEMİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN
KAYNAK KALİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Recep Onur UZUN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2010

ANKARA

Recep Onur UZUN tarafından hazırlanan LAZERLE KAYNAK İŞLEMİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN KAYNAK KALİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Ömer KELEŞ :
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Adem KURT :
Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Ömer KELEŞ :
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. İbrahim USLAN :
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih: 13/07/2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki 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 bildiririm.

Recep Onur UZUN

LAZERLE KAYNAK İŞLEMİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN KAYNAK KALİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Recep Onur UZUN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Temmuz 2010

ÖZET

Lazer kaynak yöntemi geleneksel kaynak yöntemlerine göre birçok üstün özelliklere sahiptir. Düşük ısı girdisi, dar bir ITAB oluşumu, düşük kalıntı gerilmeleri ve çarpılmalar, yüksek kaynak hızı, derin nüfuziyet, kusursuz kaynak profili, yüksek yapısal dayanım, otomasyonla birleştirme lazer kaynağının sağlamış olduğu öncelikli avantajlardır. Bunun yanı sıra yüksek verimlilik ve ekonomiklik, düşük hata oranı diğer faydalı özelliklerindendir.

Bu çalışmada 50x40 mm ebatlarında 2,0 mm kalınlığında AISI 304 paslanmaz çelik malzemeler lazer kaynağıyla alın altına birleştirilmiş, bu malzemelerden elde edilen 20x80 mm ebatlarındaki numunelerde metalografik incelemeler yapılmış, kaynak bölgesinin sertliği ölçülmüş, TS 282 EN 910 standartlarında belirtilen esaslarla üç nokta eğme deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, kaynak bölgelerinde malzeme kalınlığı (2 mm) boyunca tam nüfuziyet elde edilmiştir ve katılaştıran kaynak metali anahtar deliği formundadır. Kaynak hızının artmasıyla kaynak metali genişliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Katılaştıran kaynak metalinde östenit fazı ile tane ve alt tane sınırlarında oluşan ferrit fazı tespit edilmiştir. Kaynak hızı arttıkça geçiş bölgesi genişliğinin azaldığı tespit edilmiştir. ITAB'ta kaynak metalinden esas metale doğru uzanan yatay doğrultuda ferrit bantları tespit edilmiştir. Kaynak parametreleriyle

(lazer gücü, kaynak hızı) ferrit bantlarının oluşumları arasında ilişkiler tespit edilmiştir. Sertlik, esas metalden kaynak metaline doğru artış göstermiştir. Isı arttıkça kaynak metali sertliği ve eğme dayanımı genel anlamda arttığı görülmektedir.

Bilim Kodu : 914.1.140
Anahtar Kelimeler : Lazer, CO₂ lazer kaynağı, 304, paslanmaz çelik, üç nokta eğme
Sayfa Adedi : 103
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Ömer KELEŞ

INVESTIGATION EFFECT ON WELDING QUALITY OF LASER WELDING PARAMETERS

(M. Sc. Thesis)

Recep Onur UZUN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

July 2010

ABSTRACT

Laser welding process has many advantages than the other techniques. Low heat input, narrow HAZ, low stress strain and distortion, high welding speed, high penetration, smooth welding sections, high structural strength and automatic process are primary advantages of the laser welding. Moreover high efficiency and being economical leading less error rates are other advantages.

In this work AISI 304, 50x40 mm stainless steel test items with 2,0 mm thickness were but laser welded. These 20x80 mm test items were tested in guidance with metallographic investigation, measuring hardness, three point bending test performed as explained in TS 282 EN 910 standarts. According to the results, full penetration has been determined through the thickness (2 mm) and the solidified weld metal has the form of keyhole. With increase of welding speed, weld width decreases. Ferrite phase has been determinated within austenite phase at subgrain and grain boundary of austenite. When welding speed increases, depletion width between weld metal and base metal decreases. In the HAZ through the base metal, ferrite bands have been determined extending to the horizontal direction. There is a relation between welding parameters (laser power, welding speed) and the ferrite bands. Hardness of the weld metal is

getting higher from base metal to depletion zone. As the heat input increase the hardness of the weld metal and the bending strength are generally increase.

Science Code : 914.1.140

Key Words : Laser, CO₂ laser welding, 304, stainless steel, three point bending

Page Number : 103

Adviser : Assoc. Prof. Dr. Ömer KELEŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam Ömer KELEŞ'e ve yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Prof Dr. Bekir Sami YILBAŞ'a, Prof. Dr. Adem KURT'a ve Doç. Dr. İbrahim USLAN'a, Prof. Dr. Metin GÜRÜ ve 2001KI20590 nolu DPT projesine, TOBB Üniv. Öğretim Görevlisi Tefik DEMİR'e, manevi destekleriyle beni hiç yalnız bırakmayan çok değerli eşime ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
1.GİRİŞ	1
2.LAZER FİZİĞİ, CO ₂ LAZER KAYNAK YÖNTEMİ ve PASLANMAZ ÇELİK..	8
2.1. Lazer Fiziği	8
2.1.1. Lazer oluşumunun temel elemanları	10
2.1.2. Gaz lazerleri ve CO ₂ lazer	14
2.2. CO ₂ Lazer Kaynak Yöntemi	16
2.2.1. Lazer kaynak işlemini etkileyen unsurlar	17
2.2.2. Lazer kaynağında kullanılan koruyucu gazlar	18
2.2.3. Lazer kaynak yönteminin avantajları	19
2.3. Paslanmaz Çelikler.....	20
2.3.1. Metalurjik özellikleri.....	20
2.3.2. Fiziksel ve mekanik özellikler	21
2.3.3. Faz diyagramları.....	22
2.3.4. Paslanmaz çelik türleri	24

Sayfa

2.3.5. Paslanmaz çeliklerin kullanım alanları	29
2.3.6. Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağı	29
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	34
3.1. Kullanılan Malzeme	34
3.2. Uygulanan Yöntemler	35
3.2.1. İş parçası hazırlama.....	35
3.2.2. CO ₂ lazer kaynak yöntemi.....	36
3.2.3. Deneysel numune hazırlama	41
3.2.4. Metalografik incelemeler	42
3.2.5. Vickers mikro sertlik ölçümü.....	43
3.2.6. Üç nokta eğme deneyi.....	43
4.DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR	46
4.1. Metalografik İncelemeler.....	46
4.1.1. Kaynak metali	46
4.1.2. Geçiş bölgesi	51
4.1.3. ITAB	54
4.2. Mikro Sertlik Deneyi Sonuçları	59
4.2.1. Lazer gücünün kaynak metali sertliğine etkisi.....	60
4.2.2. Kaynak hızının kaynak metali sertliğine etkisi	61
4.3. Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları	62
4.3.1. Lazer gücünün eğme dayanımına etkisi.....	62
4.3.2. Kaynak hızının eğme dayanımına etkisi	63

Sayfa

5.TARTIŞMA VE SONUÇLAR	65
5.1. Tartışma.....	65
5.2. Sonuçlar	68
KAYNAKLAR	71
EKLER.....	77
EK-1. Deneysel çalışmada kullanılan malzemeye ait sertifika.....	78
EK-2. Deneysel çalışmada elde edilen kaynak metali genişlikleri	79
EK-3. Deneysel çalışmada elde edilen mikro sertlik sonuçları.....	81
EK-4. Deneysel çalışmada elde edilen eğme dayanımları	87
ÖZGEÇMİŞ	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Lazer türleri ve çıkış gücü aralıkları	15
Çizelge 2.2. 304 paslanmaz çeliklere ait mekanik özellikler	22
Çizelge 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin kimyasal bileşimi	34
Çizelge 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin mekanik özellikleri	34
Çizelge 3.3. AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin genel fiziksel özellikleri	34
Çizelge 3.4. Trumpf marka Lazercell 1005 model kaynak tezgahına ait teknik bilgiler	38
Çizelge 3.5. CO ₂ lazer kaynak yönteminde uygulanan parametre değerleri.....	40

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kendiliğinden emisyon	8
Şekil 2.2. Tahrik edilmiş yutma	9
Şekil 2.3. Tahrik edilmiş emisyon	9
Şekil 2.4. Lazer olayının şematik gösterimi	10
Şekil 2.5. Atomun çarpması ile pompalama	13
Şekil 2.6. Eksek akışlı CO ₂ gaz lazerinin yapısı	14
Şekil 2.7. Lazer kaynağında anahtar deliği ve plazma oluşumunun şematik gösterimi	16
Şekil 2.8. Demir – krom denge diyagramı	22
Şekil 2.9. Demir – nikel denge diyagramı	24
Şekil 2.10. Schaeffler diyagramı	25
Şekil 2.11. Delong diyagramı	32
Şekil 3.1. Kalıp modeli	36
Şekil 3.2. Numune alma	42
Şekil 3.3. Mikro sertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgeler	43
Şekil 3.4. Üç nokta eğme deneyi düzeneğinin şematik görünümü	44
Şekil 4.1. Lazer gücü – kaynak metali sertliği ilişkisi	60
Şekil 4.2. Kaynak hızı – kaynak metali sertliği ilişkisi.....	61
Şekil 4.3. Lazer gücü – eğme dayanımı ilişkisi	62
Şekil 4.4. Kaynak hızı – eğme dayanımı ilişkisi.....	63

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Lazer kaynak yönteminde kullanılan kalıp	37
Resim 3.2. Trumpf marka Truflow 4000 model CO ₂ lazer ünitesi ve Lasercell 1005 model kaynak tegahı	38
Resim 3.3. Trumpf marka Lasercell 1005 model kaynak tezgahı	39
Resim 3.4. 1 numaralı numuneye ait kaynak dikişi görüntüsü	42
Resim 3.5. Shimadzu marka AG – 1 model 5 kN kapasiteli üç nokta eğme cihazı...	44
Resim 3.6. Örnek numuneye uygulanan üç nokta eğme deneyi	45
Resim 4.1. Kaynak hızının kaynak metali genişliğine etkisi	47
Resim 4.2. Kaynak metalinde oluşan ferrit ve östenit fazları	50
Resim 4.3. Kaynak hızının geçiş bölgesi genişliğine etkisi	52
Resim 4.4. ITAB'ta östenit tane sınırlarında oluşan ferritler.....	54
Resim 4.5. ITAB'ta ferrit bantları oluşumu (kaynak hızı etkisi)	55
Resim 4.6. ITAB'ta ferrit bantları oluşumu (lazer gücü etkisi)	57

1. GİRİŞ

Lazerin tarihsel ilerleyişinin ilk adımları 1950’li yıllarda atılmıştır. Çok hızlı bir gelişme gösteren lazerin bugünkü geldiği nokta birçok uygulama ve çalışmaya hız kazandıran niteliktedir. İlk olarak Dicke, nüfus terslemesi durumunu oluşturmak (pompalama işlemiyle uyarılmış atomların sayısını arttırmak) için, kısa süreli darbe kullanma fikrini 1954’te ortaya atmıştır. Söz konusu nüfus terslemesi, kendiliğinden emisyon ile şiddetli bir patlama üretmektedir [1]. 1957’de Gould, lazeri oluşturacak olan Fabri – Perrot boşluğunu tasarlamış, ilk lazer makalesini 1959’da yayınlamıştır [2]. 1958’de Schawlow ve Townes “Infrared and Optical Masers” başlıklı bir makale yayınlamıştır [3].

Maiman, 1960’ta yakut lazerini keşfetmiştir [4]. Maiman’ın bu buluşundan hemen sonra Sorakin ve Stevenson, uranyum katkılı kalsiyum flüorür lazerleri için flaş pompalı çubuk tasarımında çalışmıştır [5]. Bu lazer, Kasım 1960’ta ilk denemede başarılı olmuştur. Katkılı kalsiyum flüorür günümüzde yaygın olarak kullanılan lazer etkisinin ilk göstergesidir [1].

1961’de Javan vd., Neon – Helyum gaz karışımından lazer elde etmiştir [6]. Yakut lazeri takiben Neodimyum lazer geliştirilmiştir [1]. 1964’te Patel, karbondioksit lazeri; Geusic vd., Nd:YAG lazeri ve Bridges, Argon – iyon lazerini elde etti [7-9]. Bugün lazerler her dalga boylarında olmak üzere katı, sıvı, gaz ve plazma materyallerinde elde edilebilmektedir [10].

Elli yılı aşkın bir geçmişe sahip lazer, keşfedildiği günden itibaren günümüze kadar uygulama alanı bulmuştur. Gittikçe genişlemekte olan bu alanlara örnek olarak, tıp, biyoloji, kimya, elektronik, metroloji, meteoroloji, makine sanayi gibi alanlar gösterilebilir. Ölçme uygulamalarında ise, kalıp ve presten gelen parçalara ait toleransların belirlenmesinde lazer kullanılabilir. Lazerler, askeri uygulamalarda, mesafe ve hız ölçmede, hedef tayininde kullanılmaktadır. Global pozisyon sistemlerinde uçakların, gemilerin, tankların, füzelerin yönlendirilmesi ve güdümünde lazer jireskoplar kullanılmaktadır. Günümüzde göz kusurlarının lazer ile

düzeltilmesi yaygın şekilde uygulanmaktadır. Karaciğer, kalp, mide ameliyatlarında lazer cihazları kullanılmaktadır. Diğer teknolojilerle yapılamayan işler bazen yalnızca lazer teknolojisi ile yapılabilmektedir [1].

Bununla beraber lazer, endüstride kesme, delme, kaynak vb. işlerde uygulama alanına sahiptir. Günümüzde endüstriyel anlamda en çok CO₂ ve Nd:YAG lazerleri kullanılmaktadır. Lazer tezgâhları hızlı işleme yaparlar. İşlemenin fiziksel özelliklerine göre özel takımlara ihtiyaç duymazlar. Tezgâh üniteleri ile malzeme arasında temas olmaz. Çapaksız işleme yaparlar. Yüksek kurulum maliyetleri, lazer tezgâhlarının en büyük dezavantajıdır [11].

Benyounis vd., lazer kaynak parametrelerinin ve ısı girdisinin kaynak dikişi profiline etkisini incelemiştir. Orta karbonlu çelik malzemelerin alın altına birleştirilmelerinde sürekli modda çalışan 1,5 kW maksimum çıkış gücüne sahip CO₂ lazeri kullanmıştır. Lazer gücünün azalması veya kaynak hızının artmasıyla ısı girdisinin azaldığını, dolayısıyla nüfuziyetin azaldığını tespit etmiştir. Ayrıca kaynak hızının azalmasıyla kaynak dikişi ve ITAB genişliğinin azaldığını tespit etmiştir [12].

Benyounis vd., lazer kaynak parametreleriyle (lazer gücü, kaynak hızı, odak mesafesi) kaynak metalinin gerilme ve darbe özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemiştir. 304 paslanmaz çelik malzemeden oluşan numuneleri 1,5 kW maksimum çıkış gücüne sahip Rofin marka sürekli mod CO₂ lazer kaynak tezgahında alın altına birleştirmiştir. Koruyucu gaz olarak 5 l/dk akış debisinde argon kullanmıştır. Yaptığı çalışmada 1,2 kW lazer gücü uygulanan kaynak dikişinin en yüksek çekme dayanımına sahip olduğunu tespit etmiştir [13].

Quan vd., lazerle birleştirilmiş AZ31 magnezyum alaşımlarının gerilme özellikleri ve mikro yapısında ısı girdisinin etkilerini incelemiştir. Yapmış olduğu çalışmada 3 kW maksimum çıkış gücüne sahip sürekli mod CO₂ lazer kaynağı kullanmıştır. 1,5 mm kalınlığındaki malzemeleri alın altına birleştirmiş, koruyucu gaz olarak 12 l/dk akış debisiyle argonu tercih etmiştir. Elde ettiği sonuçlarda ısı girdisindeki artışla beraber

nüfuziyetin ve kaynak genişliğinin arttığını tespit etmiştir. Ayrıca ısı girdisinin artmasıyla çekme dayanımı artmaktadır [14].

Costa vd., sert metallere çeliklerin lazer kaynak yöntemiyle birleştirilmesini incelemiştir. Deneysel çalışmasında maksimum çıkış gücü 6 kW olan Rofin Sinar marka sürekli mod CO₂ lazer, sürekli mod Nd:YAG lazer ve darbe modlu Nd:YAG lazer tezgahları kullanmıştır. K10, K40 sert metalleri ile DIN 17007 standardına uygun 1.7182 çeliği seçtiği malzemelerdir. Çalışma sonucunda kaynak dikişinin konik şeklinde süzensiz bir kesit oluşturduğunu ve kesitin orta ekseninde genişleme olduğunu, dar ITAB ve asgari kalıntı gerilmeleri tespit etmiştir. Bazı örneklerde ısı yayılım hatları belirlemiştir. Kaynak hızı arttıkça eğme dayanımının azaldığını belirlemiş; ayrıca, sert metale ait esas metal ve ITAB'ın sertliğinin yüksek olduğunu göstermiştir [15].

Zambon vd., CO₂ lazer kaynağı ile birleştirdiği süper östenitik AISI 904L paslanmaz çelik malzemelerin mikro yapılarını, kompozisyonlarını ve kalıntı gerilmelerini incelemiştir. 3 mm kalınlığa sahip paslanmaz çelik malzemeleri maksimum çıkış gücü 6 kW olan CO₂ lazer tezgahında birleştirmiştir. Kaynak metalinin tamamen dendritik yapıda olduğunu tespit ederek, kaynak metalinin lazer ışını ekseninde ölçülen mikro sertlik değerinin esas metal bölgesine yaklaştıkça azaldığını belirlemiştir. Ayrıca, elde ettiği sonuçlarda kaynak hızı arttıkça sertlik değeri azalmıştır [16].

Wu vd., araç gövdelerinde uygulanan CO₂ lazer kaynak yöntemi üzerine bir araştırma yapmıştır. 1,5 kW maksimum çıkış gücüne sahip sürekli mod CO₂ lazer kaynağı kullanmıştır. Yüksek dayanımlı DOGAL 800 DP galvaniz çelik ve BUSD çeliği kullandığı çalışmada koruyucu gaz olarak argon ve nitrojen tercih etmiştir. Argon koruyucu gazı, lazer ışınının daha derinlere nüfuz etmesini sağlamıştır. Kaynak dikişi genişliğinin lazer gücü arttıkça arttığını, kaynak hızı arttıkça azaldığını tespit etmiştir [17].

Tani vd., CO₂ lazer – MIG hibrit kaynağında koruyucu gazın etkisini araştırmıştır. 3 kW maksimum çıkış gücüne sahip CO₂ lazer ve CEBORA MIG 3840/T marka MIG hibrit kaynak tezgahında 304 paslanmaz çelik malzemeleri alın altına birleştirmiştir. Koruyucu gaz olarak helyum, argon ve oksijen içeren karışım gazları kullanmıştır. %30 helyum içeren koruyucu gazın akış debisi arttıkça kaynak nüfuziyeti azalmıştır. Bunun yanı sıra, %40 ve %60 helyum içeren koruyucu gazların akış debileri arttıkça nüfuziyet artmıştır. Ayrıca her üç farklı koruyucu gazın akış debisi arttıkça kaynak dikişi genişliği azalmıştır [18].

Chung vd., otomotiv endüstrisinde sık kullanılan düşük karbonlu galvaniz çeliklerin CO₂ lazer kaynağıyla birleştirilmelerinde koruyucu gaz türlerinin etkisini incelemiştir. 1,5 mm kalınlığında düşük karbonlu galvaniz çelik kullanmıştır. 6 kW maksimum çıkış gücüne sahip CO₂ lazer kaynak tezgahında çalışmıştır. Kullandığı koruyucu gazlar helyum, argon, karbondioksit, azot ve %50 argon + %50 azot karışımıdır. Elde ettiği sonuçlara göre karışım gazı ve helyum birleşmede tam nüfuziyet sağlarken, argon koruyucu gazı eksik nüfuziyete sebep olmuştur [19].

Mei vd., otomotiv sanayide yine sıkça kullanılan yüksek dayanımlı galveniz çelik levhaların lazer kaynağı ile birleştirilmesi üzerinde araştırma yapmıştır. PHC – 1500 marka 1,5 kW maksimum çıkış gücüne sahip sürekli mod CO₂ lazer kaynağı kullandığı bu çalışmada ele aldığı malzeme DOĞAL 800 DP yüksek dayanımlı galvaniz çeliktir. Koruyucu gaz olarak argon kullanmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre lazer gücü arttıkça kaynak dikişi derinliğinin genişliğine oranı artmıştır. 1,3 kW lazer gücünde tam nüfuziyet elde etmiştir. 1,2 m/dk'dan yüksek kaynak hızlarında tam nüfuziyetin sağlanamadığını tespit etmiştir. ITAB serliğinin kaynak metali sertliğinden yüksek olduğunu belirlemiştir. Bunun durumun kaynak sırasında ısı girdisi ve soğuma hızının yeterince hızlı olmasından kaynaklandığını ifade etmiştir [20].

Yan vd., lazer, TIG ve lazer – TIG hibrit kaynak yöntemleriyle birleştirdiği 304 paslanmaz çeliklerin mikro yapıları ve mekanik özellikleri üzerinde çalışmıştır. 5 kW maksimum çıkış gücüne sahip Rofin TR050 marka CO₂ lazer kaynağı ile Miller

300A marka geleneksel TIG kaynağını kullanmıştır. TIG kaynağı ile oluşturulan kaynak metalini incelediğinde esas metalle arasında belirgin bir geçiş bölgesi tespit etmiştir. Bu geçiş bölgesi lazer ve hibrit kaynak yöntemleriyle oluşturulan kesitlerde belirsiz görünümdeydir. Her üç kaynak yönteminde de kaynak metalinde dendritik yapıdadır [21].

Caiazzo vd., CO₂ lazer kaynağı ile alın altına birleştirdiği Ti₆Al₄V levhaların mekanik ve yapısal özelliklerini incelemiştir. Çalışmasını, 2,5 kW maksimum çıkış gücüne sahip Rofin Sinar DC025 CO₂ lazer kaynağında gerçekleştirmiştir. Koruyucu gaz olarak helyum ve argon kullanmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre helyum ile yapılan kaynaklarda nüfuziyet daha fazladır. Nüfuziyetin lazer gücü arttıkça arttığını, kaynak hızı arttıkça azaldığını tespit etmiştir. En yüksek sertlik kaynak metalinde ölçülmüştür [22].

Yılbaş vd., düşük karbonlu çeliklerde lazer kaynak yöntemi ve termal analizi üzerine çalışmıştır. Kaynak metalindeki kalıntı gerilmelerini sonlu elemanlar analiziyle tespit etmiştir. Ayrıca, lazer kaynak yönteminde sıcaklık ve gerilme dağılımlarını incelemiştir. Elde ettiği sonuçlara göre, sıcaklık düşüşü esas metale oranla kaynak metalinde daha yavaştır. Bunun nedeni, kaynak metalinde lazer enerjisinin absorpsiyonu ve dağılımıdır [23].

Durmuş ve Meriç, çalışmalarında toz metalürjisiyle elde ettikleri Al99 matrisli SiC takviyeli kompozit malzemenin CO₂ lazer kaynağı ile birleştirilmesini incelemiştir. Bu amaçla, ağırlıkça % 0, % 5, % 10, % 20 oranlarında SiC takviye elemanı ile Al99 alüminyum tozu karıştırılarak homojen toz karışımları sağlamıştır. % 0 ve % 5 SiC içeren kompozitler için 0.5 m/dk lazer kaynak hızı uygun iken, %10 ve %20 SiC içeren kompozitler için 0.3 m/dk kaynak hızının uygun olduğunu bulmuştur [24].

Tokdemir, yapmış olduğu çalışmada lazer kaynağı ile birleştirdiği demir esaslı toz metal malzemelerin kaynak bölgesindeki mekanik özelliklerini incelemiştir. Demir – grafit kompozit malzemeleri maksimum çıkış gücü 2 kW olan Rofin – Sinar SM 2000 marka sürekli mod CO₂ lazer kaynak tezgâhında birleştirmiştir. Elde ettiği

sonuçlara göre, kaynak hızı arttıkça, hızlı soğumadan dolayı kaynak merkezindeki sertlik değerleri artmaktadır. Düşük kaynak hızlarında daha yüksek çekme dayanımı elde etmiştir. Ayrıca kaynak hızı arttıkça eğme dayanımı azalmaktadır [25].

Keskin vd., lazer kaynağıyla birleştirdiği östenitik paslanmaz çeliğin kaynak bölgesi mikro yapısı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Alın altına birleştirdiği 316 L paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesinde sertlik ölçümleri yaparak hazırladığı numuneleri çekme deneyine tabi tutmuştur. Elde ettiği kaynak dikişi çok dar sınırlar içerisinde olup dikiş genişliği yaklaşık 1,5 mm'dir. Kaynak bölgesinde herhangi bir çatlak, eksik nüfuziyet, gözeneklilik görmemiştir. Çekme deneyi sonucunda kopma olayının kaynak metali veya ITAB'tan değil, ana metalden gerçekleştiğini tespit etmiştir. En yüksek sertlik değerini kaynak metalinde tespit ederken ITAB'ın sertliğinin daha düşük olduğunu belirlemiştir. Kaynak işlemi sonrasında katılaşma olayı çok kısa sürede tamamlandığından kaynak bölgesinde tane küçülmesi gözlemlenmiştir [26].

Bu çalışmanın amacı, CO₂ lazer kaynak yönteminde kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkilerinin üç nokta eğme testleri ile incelenmesidir. Malzeme olarak AISI 304 paslanmaz çelik kullanılmıştır. CO₂ lazer kaynak yöntemiyle ilave metal kullanılmadan alın altına birleştirilen numunelerde metalografik incelemeler yapılmış, kaynak metali, ITAB ve esas metalin mikro sertlikleri ölçülmüş ve TS 282 EN 910 standardına göre numunelere üç nokta eğme deneyi uygulanmıştır.

Birinci bölümde çalışmayla ilgili incelenen literatür araştırmaları ile bu çalışmanın amaç ve kapsamı ele alınmıştır.

İkinci bölümde lazer fiziğinden bahsedilerek lazer oluşumunun temel elemanları ele alınmıştır. Ayrıca CO₂ lazer ünitesi ve çalışma prensibi, lazer kaynak yönteminin avantajları, kaynak işleminde parametreler, koruyucu gazlar bu bölümün içeriğidir. Paslanmaz çelik türleri, fiziksel ve mekanik özellikleri ve östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak işlemleri bu bölümde ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde deneysel çalışmada uygulanan yöntemlerden bahsedilmiştir. 80x40 mm ebatlarında ve 2 mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik numuneler, tasarlanan özel kalıp üzerinde Rofin – Sinar marka maksimum çıkış gücü 4 kW olan sürekli mod CO₂ lazer kaynak tezgahında birleştirilmiştir. Bu işlem için özel bir kalıp tasarlanmış ve kaynak işleminin sağlıklı şekilde yapılması sağlanmıştır. Elde edilen kaynaklı numuneler 20x80 mm ebatlarında kaynak dikişine dik doğrultuda kesilmiştir. Her bir kaynak metalinin mikroyapısı incelenmiştir. Kaynak metali, geçiş bölgesi ve esas metalin mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. TS 282 EN 910 eğme deneyi standardına göre kaynak dikişlerinin eğme dayanımları tespit edilmiştir.

Dördüncü bölümde, deneysel bulgular ve sonuçlar ifade edilmiştir. Öncelikle kaynak bölgesinin mikroyapısı incelenerek kaynak parametrelerinin etkileri ele alınmıştır. İşlem parametreleriyle sertlik ve eğme dayanımları arasındaki ilişkiler tespit edilmiştir.

Beşinci bölümde konuyla ilgili tartışma, sonuç ve öneriler ele alınmıştır. Deneysel bulgular, literatür araştırmalarıyla eşleştirilerek elde edilen sonuçlar bu bölümde ifade edilmiştir.

2. LAZER FİZİĞİ, CO₂ LAZER KAYNAK YÖNTEMİ ve PASLANMAZ ÇELİK

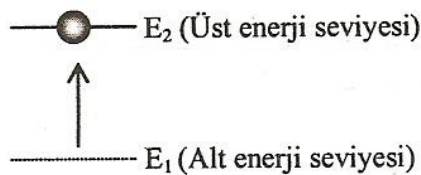
2.1. Lazer Fiziği

Bir maddenin E_1 ve E_2 ($E_1 < E_2$) olmak üzere iki enerji seviyesi olduğunu farz edelim. Başlangıçtaki atom E_1 enerji seviyesinde bulunsun. Bu atom, E_2 enerji seviyesine ancak, uyarılmaya neden olan aşağıdaki şartlardan birinin yerine getirilmesi ile çıkabilir:

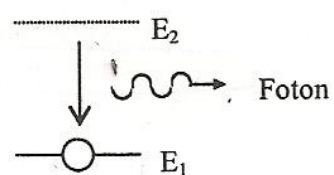
- Isıtılarak,
- Basınç uygulanarak,
- Hızlandırılmış elektronlarla bombardıman edilerek,
- Hızlandırılmış parçacıklarla bombardıman edilerek,
- Bir ışık demetinin etkisine maruz bırakılarak.

Uyarılarak E_2 enerji seviyesine çıkarılan atom E_1 enerji seviyesine inmek isteyecektir. Bu geçiş anında sahip olduğu $E_2 - E_1$ enerji farkını ortama bırakacaktır. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, atomdan açığa çıkan enerji elektromanyetik dalga (foton) olarak ortama yayılacaktır. Bu olaya kendiliğinden emisyon denir [27, 28].

Kendiliğinden emisyonun önce



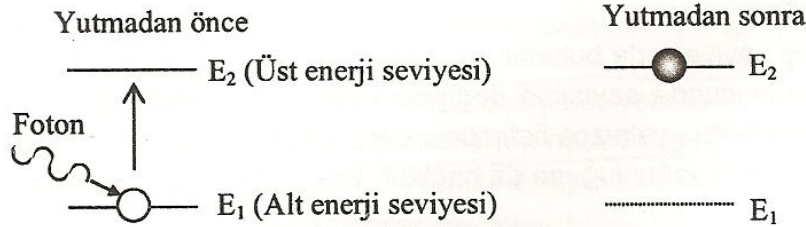
Kendiliğinden emisyonun sonra



Şekil 2.1. Kendiliğinden emisyon [3]

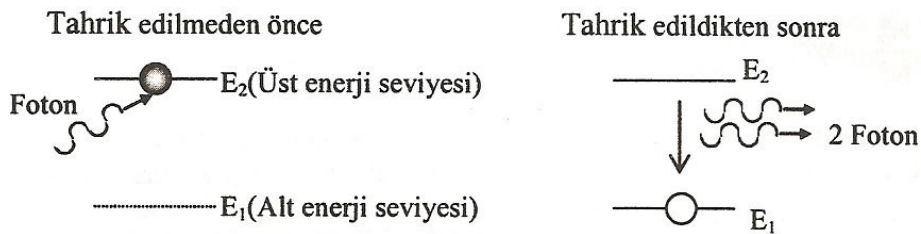
Lazer fiziğini oluşturan diğer bir unsur yutmadır. Başlangıçta E_1 enerji seviyesindeki atoma bir elektromanyetik dalga (fotonun) çarpması durumunda, fotonun sahip olduğu enerji atom tarafından yutulur. Yutulan enerji, atomu E_2 seviyesine yükseltir.

Söz konusu olay yutma olarak tanımlanmaktadır (Bkz. Şekil 2.2). Atoma çarpan dalganın enerjisi daha sonra $E_2 - E_1$ enerji farkına dönüşecektir [1].



Şekil 2.2. Tahrik edilmiş yutma [1]

Lazeri oluşturan son unsur tahrik edilmiş emisyonudur. E_2 enerji seviyesinde bulunmakta olan atoma foton çarptığında E_1 enerji seviyesine düşecektir. Bu esnada çarpan elektromanyetik dalganın enerjisine $E_2 - E_1$ enerji farkı ilave olunacaktır. Bu olaya tahrik edilmiş emisyon denir. Tahrik edilmiş emisyonda, giren her bir fotona karşılık iki foton bırakılır [1].

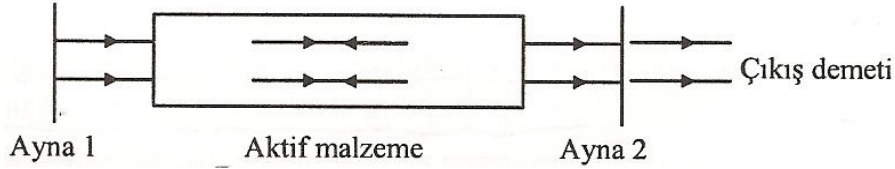


Şekil 2.3. Tahrik edilmiş emisyon [1]

Lazer materyalinden ışın demeti elde etmek için aşağıdaki üç şartın sağlanması gerekir:

- Sistem, nüfus terslemesi durumunda bulunmalıdır. Yani, taban durumundakinden daha fazla uyarılmış durumda atom olmalıdır.
- Sistemin uyarılmış durumu yarı kararlı bir durum olmalıdır. Böyle durumlarda uyarılmış ışımaya kendiliğinden ışımadan önce olur.
- Yayılan fotonlar diğer uyarılmış atomlardan ışımaya yaptırmaya yetecek kadar uzun süre sistem içinde tutulmalıdır. Bu durum, sistemin ucuna yansıtıcı

aynaların yerleştirilmesiyle sağlanır. Uçlardan birisi tamamen yansıtıcı olur, diğer uç ise lazer demetinin çıkışına izin verecek şekilde yarı geçirgen yapılır [1].



Şekil 2.4. Lazer olayının şematik gösterimi [1]

2.1.1. Lazer oluşumunun temel elemanları

Bir lazer ışık kaynağı elde etmek için aşağıda belirtilen dört adet fonksiyonel elemana gereksinim duyulur [1].

- Aktif ortam
- Uyarma mekanizması
- Geri besleme mekanizması
- Çıkış bağdaştırıcısı

Aktif ortam

Aktif ortam, en alt enerji düzeyinde bulunan atomların sayısından uyarılmış durumdaki atomların sayısının fazla olmasını sağlamak için kullanılır. Bu ortamda, uyarılmış atomların yüzdesi arttıkça, emisyon olasılığı da artar. Buna göre, aktif ortamda şu iki durumun olması şarttır: İlk olarak, aktif ortamda atomlar foton yaymak üzere kendiliğinden uyarım yapabilecek uyarılmış emisyon seviyelerinde bulunmaları gerekir. İkinci olarak, foton yayarak en alt seviyelere düşen elektronların sayısından uyarılmış atomların sayısı fazla olmalı, yani elektronların uyarılmış seviyeye pompalanmaları gerekir.

Yalnızca nüfus terslemesine uğrayabilen malzemeler, aktif ortam olarak kullanılabilirler [1]. Işın demeti, aktif ortamın bir ucundan girer ve ışık tayfının

yoğunluğu artmış olarak aktif ortamın diğer ucundan çıkar. Aktif ortam lazerlerde optik kazanç sağlar. Aktif ortam;

- Gaz,
- Sıvı,
- Katı – hal,
- Yarı iletken

materyallerden herhangi biri olabilir. Lazerin ilk aktif ortamı olan Yakut kristali, katı aktif ortam materyaline örnektir. Sıvı aktif ortam olarak boya lazerleri kullanılır. Gaz aktif ortamlarına örnek olarak helyum ve neon gazlarının karıştırılması veya karbondioksit gazı gösterilebilir. Yarı iletken aktif ortama örnek olarak, galyum arsenit verilebilir [29].

Uyarma mekanizması

Aktif ortamda en alt enerji seviyesinde bulunan elektronların, uyarılmış durumda bulunan yüksek enerjili atomlardan sayıca fazla olması için uyarma mekanizması gereklidir. Uyarma mekanizması, düşük enerji seviyesindeki elektronların enerji kaynağı ile pompalanmaları suretiyle oluşur [30].

Uyarma mekanizması, yarı iletken ve gaz lazerlerde aktif ortamdan elektrik akımı geçirilmek suretiyle gerçekleştirilir. Katı ve sıvı lazerlerde ise genellikle optik pompalama yöntemi kullanılır.

Lazere dışarıdan verilen enerjiyle gerçekleştirilen nüfus terslemesi işlemi pompalama olarak tanımlanır [31]. Lazer olayında kullanılan pompalama yöntemleri şunlardır [1]:

- Optik pompalama
- Elektron çarpmasıyla pompalama

- Atom çarpmasıyla pompalama

Optik pompalama

Bu yöntemde genellikle gaz veya katı malzemeden oluşan aktif ortam ışık kaynağı tarafından ışıklandırılır. Böylece atomlar uyarılır ve yeni fotonlar bırakmaya hazır hale gelmiş olurlar [32]. Bu olaya optik pompalama adı verilir.

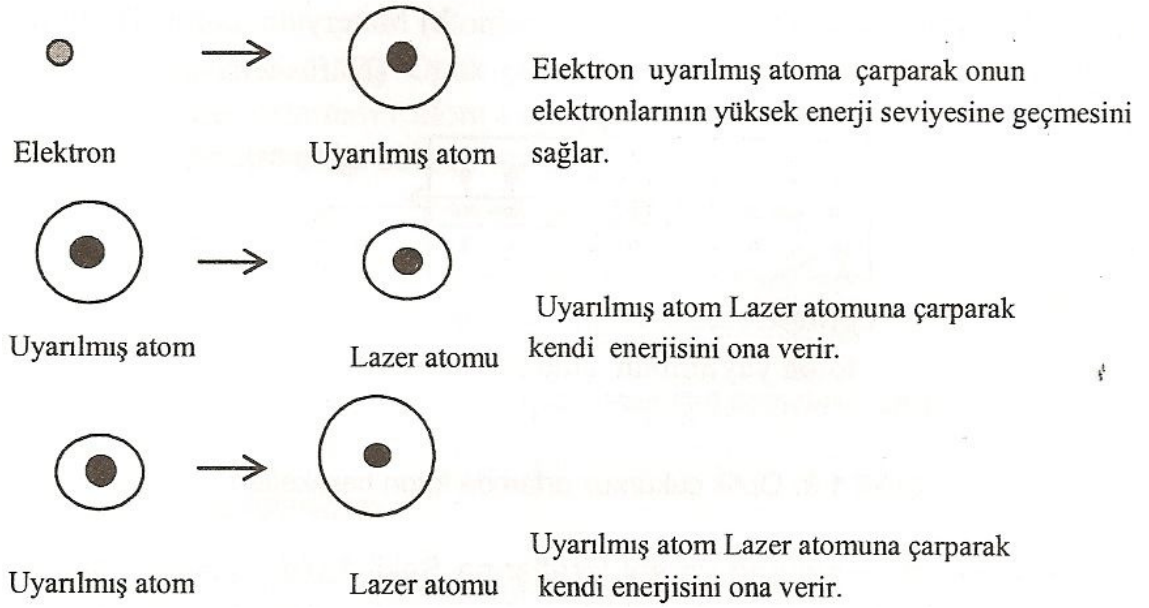
Elektron çarpmasıyla pompalama

Elektron tabancası ortamın içine odaklanmış olursa, ortam içindeki elektronlar ve atomlar vurulabilir. Çarpan elektronlar yeterli enerjiye sahipse, kendi enerjisini çarptığı atoma aktararak düşük enerji seviyesindeki atomu uyarır [1]. Eğer ortamdaki atomlar yeteri kadar uyarılmış ise nüfus terslemesi meydana gelir. Elektron çarpmasıyla pompalama şekli en çok gaz lazerlerde kullanılmaktadır [33].

Atom çarpmasıyla pompalama

Bu pompalama türünde uyarılmış atom veya moleküller kullanır. Burada esas olay iki atomun çarpışmasıdır [1]. Bu durumda gelişen olaylar sırası ile şekil 2.5'te gösterilmiştir.

İlk olarak elektrik boşalmasından sonra ortaya çıkan elektron, atoma çarpar ve onu uyarmış duruma getirir. Daha sonra, bu atom lazer ortamında başka bir atoma çarparak enerjisini ona verir. Bunun sonucunda çarpan atom toprak seviyesine iner, çarpılan lazer atomu ise, uyarılmış vaziyete geçer. Eğer, ortamda yeteri kadar uyarılmış atom varsa, nüfus terslemesi meydana gelir [1].



Şekil 2.5. Atomun çarpması ile pompalama [1]

Geri besleme mekanizması

Geri besleme mekanizması, orijinal ışığın bir kısmını aktif ortama geri gönderir. Genellikle iki ayna içerir. Aynalar aktif ortamın iki ucuna, aktif ortamdan çıkan ışınlar dik gelecek şekilde yerleştirilirler [34].

Çıkış bağdaştırıcısı

Çıkış bağdaştırıcısı, yansıtıcı iki ayna arasındaki lazer ışığının bir bölümünün aktif ortamdan lazer ışın demeti olarak dışarıya çıkmasına müsaade eden kısımdır. Geri besleme mekanizmasındaki aynalardan biri ışığın bir kısmını lazer dalga boyunda aktif ortamdan serbest bırakır. Çıkış bağdaştırıcısının, dışarıya iletilmesine müsaade ettiği lazer demetinin miktarı lazer cihazına bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, dışarıya çıkmasına müsaade ettiği ışının oranı bazı helyum – neon lazerlerde %1'den az, katı hal lazerlerinde ise %80'den fazladır [1].

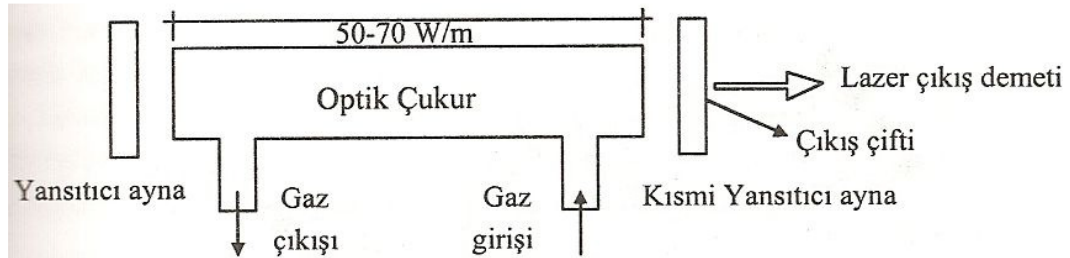
2.1.2. Gaz lazerleri ve CO₂ lazer

Gaz lazerleri üç ana başlık altında incelenebilirler:

- Etkisiz atom gaz lazerler
- İyonlaştırılmış atom gaz lazerler
- Moleküler gaz lazerler

CO₂ lazerler, moleküler gaz lazerlerin en iyi temsilcilerindendir. 1964 yılında Patel tarafından icat edilmiştir [7]. Burada lazer olayı için CO₂'in molekül titreşim durumları kullanılmaktadır [1].

CO₂ lazer türlerinden biri Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Gaz tüp boyunca akar. Gaz akışı eksen üzerinde olduğundan dolayı bu lazere eksen akışlı CO₂ lazer denir [1].



Şekil 2.6. Eksen akışlı CO₂ gaz lazerin yapısı [1]

Eksen akışlı CO₂ lazerlerin iki türü vardır [1]:

- Düşük eksen akışlı CO₂ lazerler,
- Yüksek eksen akışlı CO₂ lazerler

CO₂ lazerlerde gaz akış şiddeti arttıkça çıkış gücü de artar. Düşük eksen akışlı lazerlerle yüksek eksen akışlı lazerler arasında olan esas fark yalnızca akış şiddetindedir. Yüksek eksen akışlı lazerlerde gaz toplanır, soğutulur ve yeniden sisteme döndürülür. Işının yansımalarını birkaç kat artırmak için bu lazerde büyük

boyutlu aynalar kullanılır. Sonunda, birkaç defa yansıtılmış olan ışın dışarıya çıkar. Yansıtma yapısı kullanmakla az bir alanda yüksek güç elde edilebilir. Uyarılmadan sonra, kimyasal katalizleme yöntemi ile gaz molekülleri yeniden inşa edilir ve tekrar kullanılmak üzere ortama döndürülür. Bu prensipte çalışan bir CO₂ lazerinden sürekli (CW) modda 20 kW'a kadar güç elde edilebilir. Soğutucu gaz karışım teknolojisiyle sanayi uygulamalarında kullanılan 45 kW ortalama güce sahip CO₂ lazerler yapılabilir. Çizelge 2.1, diğer lazer türlerinin çıkış gücü aralıklarıyla CO₂ lazerinin çıkış gücü aralığını göstermektedir. CO₂ lazer, malzemelerde kesme, yüzey işlemleri ve kaynak işlemleri için uygundur [1].

Çizelge 2.1. Lazer türleri ve çıkış gücü aralıkları [1]

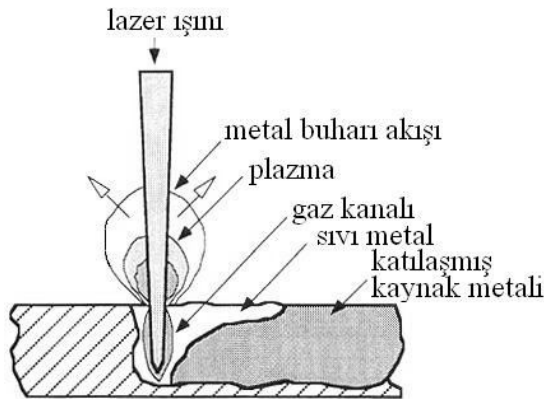
Lazer Tipi	Dalga boyu, λ (nm)	Çıkış gücü (W)
He – Ne	632,8	0,1 – 1×10^{-3}
Argon	488	0,3 – 50
He – Cd	441,6	0,01 – 0,2
Bakır (CVL)	510,5	10 – 100
CO ₂	10600	0,2 – 45×10^3
Excimer	248	40 – 120
Boya (Rh6G)	577	10 – 100
Yarı – İletken	800	1 – 40
Nd:YAG	1064,1	6×10^{-3}
Nd:Cam	1062,3	850

Endüstriyel lazerlerin birçoğunda, lazer ışınının oluşabilmesi için özel gazların kullanılması gereklidir. Gazın kalitesi ve seçimi, lazerin güvenilirliğini ve işlemin verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Lazer gazları genellikle, yüksek saflıkta özel gazlardır. Lazer gazları, makineye ayrı ayrı tüplerde ya da önceden belli oranlarda karıştırılmış olarak verilmektedir. Bu ön karıştırma ya da gazların ayrı tüplerde verilmesindeki işlem parametreleri (gaz debisi, basınç saflığı vb.) her lazer makinesi üreticisi tarafından özel olarak belirlenir [35].

Genellikle CO₂ lazerini oluşturan gazlar şunlardır: Karbondioksit, azot ve helyum. Bazı lazer gazları dört ya da beş bileşen içerebilir [36].

2.2. CO₂ Lazer Kaynak Yöntemi

Lazer ortamından çıkan ışın, birçok yönlendirme aynasından yansiyarak odaklama mekanizmasına ulaşır. Odaklanma sonucunda lazer ışını çok küçük bir alana yoğunlaştırıldığında, yerel bir erimeyi ve buharlaşmayı sağlar. Buharlaştırma sıcaklığına ulaşıldıktan sonra lazer enerjisinin malzeme tarafından emilmesi devam ederken buharlaşmış malzeme ve koruyucu gazdan oluşan bir karışım yoğunlaşır. Böylelikle plazma oluşmuş olur. Oluşan bu plazmanın absorpsiyon derecesi eriyiğinkinden daha fazla olduğundan, lazer ışını enerjisinin plazmada oluşturduğu ısı, erimekte olan malzemeye geçerek iş parçasına iletilir. Malzeme içinde, eriyik maddenin çok yüksek sıcaklık ve basınç seviye farklılıklarından kaynaklanan, şiddetli dolaşımların olduğu, akıcı fazlı bir buhar kanalı (anahtar deliği) oluşur (Bkz. Şekil 2.7). Eriyiğin kanal etrafında devamlı akması ve anahtar deliğinin arkasında yoğunlaşmasıyla bu kanal uyarılır. Eriyik, ısınan buharın basıncıyla iş parçasının yüzeyine yükselir ve bu arada çekim kuvveti, viskozite ve yüzey gerilmeleriyle devam eden genleşmeler de engellenir. Katılaşmadan sonra homojen bir yapıya sahip dar bir kaynak dikişi oluşur. Yüksek enerjili bir ısı kaynağıyla oluşturulan kaynak dikişinde, iş parçasındaki ITAB çok dar sınırlar içinde kalır [37].



Şekil 2.7. Lazer kaynağında anahtar deliği ve plazma oluşumunun şematik gösterimi [38]

Anahtar deliği oluşuktan sonra delik bölgesindeki eriyen malzemenin lazer ışınını yutma oranı % 98 'e ulaşır ve burada bir erime havuzu oluşur. Bundan sonra, iş

parçası veya ışın demeti sabit bir hızla hareket ettirilmeye başlar ve iş parçası üzerinde sürüklenir. Bu durumda, çukurun hareket istikameti tarafında erimiş vaziyette olan metal, siyah cisim gibi davranarak malzeme yüzeyine çarpan lazer ışın demetinin büyük bir kısmını yutar. Bu yolla metal, ışının hareket istikametinde eritilir, geride kalan eritilmiş kısım ise katılaşır. Uygulanan lazer ışın demetinin gücü, belirli kaynak hızında metali eritecek kadar büyük, ama çukurdaki metali buharlaştırıp yok etmeyecek kadar düşük olarak seçilmelidir. Kaynak çukuru oluşturarak malzemelerin kaynatılması işlemi, özellikle kalın saçların kaynak edilmesi için uygun olan bir yöntemdir [39].

2.2.1. Lazer kaynak işlemini etkileyen unsurlar

Lazer kaynak işleminde kaynak dikişinin kalitesini belirleyen faktörler iki grupta incelenebilir:

- Kaynak parametreleri
- Malzemenin ışını yutma ve yansıtma özellikleri

Lazer kaynak yönteminde ele alınan kaynak parametreleri aşağıdaki gibidir:

- Lazer gücü,
- Kaynak hızı,
- Koruyucu gaz türü, akış hızı ve basıncı,

Bu parametrelerin yanlış seçilmesi kaynağın bozuk olmasına sebep olur [35].

Lazer kaynak yönteminde iş parçasının fiziksel özellikleri kaynak dikişi kalitesinin tayininde yüksek önem taşımaktadır. Özellikle, malzemenin cinsine göre, iş parçasının sahip olduğu, lazer enerjisinin serbest bıraktığı ısıyı absorbe etme özelliği kaynak kalitesinin en iyi şekilde elde edilebilmesi için çok önemlidir.

Metaller lazer ışını geçirmezler ve malzeme yüzeyine çarpan ışın demeti yüksek oranda yansır. Lazer ışını, çoğu metal tarafından yansıtıldığı için çarptığı metalin yüzeyine yakın bir bölgede küçük derinlikte ve genişlikte bir çukur açabilir. Paslanmaz çelik sac lazer ışın demetinin %98'ini yansıtır [40]. Malzeme sıcaklığının artması ile yüzey yansımaları azalır.

Yutma, malzeme tarafından tutulan lazer enerjisinin malzeme yüzeyine çarpan lazer enerjisine oranı olarak belirlenir. Yutma, malzemenin cinsine, yüzey şartlarına, lazer ışınının dalga boyuna ve lazer ışın demetinin malzeme yüzeyine çarpma açısına bağlıdır. Lazer ışınının malzeme tarafından maksimum oranda yutulması, demetin malzeme yüzeyine 90° açı ile çarpmasıyla meydana gelmektedir [41].

Malzemelerin lazer demetini yutmaları, iletimde bulunan serbest elektronların sayısına bağlı olarak değişmektedir. Metallerin ısınması, kafes yapısında bulunan serbest elektronların titreşmesi yoluyla olmaktadır. Metallerin sıcaklığı arttıkça malzemedeki serbest elektron sayısı ve titreşimi artacağından lazer ışın demetinin malzeme tarafından yutulma miktarı da artmaktadır [42].

Sac levhaların oda sıcaklığında soğuk olarak çekilmelerinden dolayı yüzeyleri çok düzgündür, üzerlerinde film tabakası ve oksit bulunmaz. Sac metallerin lazer ışınlarını yutma kabiliyeti metal parlaklığına, optik özelliklerine ve bulunduğu ortam sıcaklığına bağlıdır.

Anahtar deliği yöntemi ile kaynakta, malzemeler kılavuz çukuru oluştuktan sonra uygulanan lazer ışın demetinin yaklaşık %98'ini yutar [43].

2.2.2. Lazer kaynağında kullanılan koruyucu gazlar

Lazer kaynağında kullanılan koruyucu gazın iki önemli rolü vardır. Birincisi oksitlenme ve atmosferik kirlenmeye karşı kaynak bölgesini korumak, ikincisi ise anahtar deliği üzerinde oluşan plazma teşekkülünü bastırarak kaynakta meydana gelebilecek şekil bozukluklarını önlemektir [1].

Malzeme yüzeyinin oksitlenmesini önleme amacıyla argon ve helyum gazları kullanılır. Bu gazlar, ayrı ayrı da kullanılabildiği gibi uygulamada en çok karşılaşılan %50 Ar, %50 He karışım gazıdır. Argonun helyumla berber kullanılması iyi bir dikiş yüzeyi ve oksitlenmeye karşı iyi bir koruma sağlamaktadır [1].

2.2.3. Lazer kaynak yönteminin avantajları

Diğer kaynak yöntemlerine nazaran lazer kaynağına üstünlük kazandıran en önemli nitelikler aşağıdakilerdir [35]:

- Kaynak işlemi, dolgu malzemesi kullanmadan da gerçekleştirilebilir.
- Kaynak hızı yüksektir.
- Lazer kaynak işlemi kolaylıkla otomasyona tabi tutulabilir.
- Optik olarak geçirgen (şeffaf, saydam) materyallerin yardımı ile kaynak ortamındaki hava şartları kontrol edilebilir.
- İş parçası üzerine hiçbir kuvvetin etkisi yoktur.
- Atmosfer koşullarında çalışma olanağı vardır.
- Takım aşınması söz konusu değildir.
- Zor ulaşılan yerlerde kaynak yapabilme olanağı vardır.
- Yüksek nüfuziyete sahiptir.
- ITAB çok dardır.
- Diğer kaynaklardaki çarpılmalar yoktur.

Lazer kaynağı işleminin bazı kusurları da vardır. Sert metallerin lazerlerle kaynatılması, kaynak bölgesinde mikroskobik kaynak kusurlarının oluşmasına ve kaynak bölgesinin kırılgan olmasına sebep olmaktadır. Ancak bu kusur, geleneksel kaynak yöntemlerinin aynı tipten olan kusurlar ile mukayese edildiğinde ihmal edilebilir. Yukarıda gösterilen sebeplerden dolayı gün geçtikçe lazer kaynağının endüstride kullanım alanı artmaktadır [35].

2.3. Paslanmaz Çelikler

2.3.1. Metalürjik özellikleri

Paslanmaz çelikler, içlerinde ağırlıkça en az % 10,5 oranında krom bulunduran demir esaslı alaşımlar olarak tanımlanırlar. Yüzeylerinde oluşan ince ve yoğun krom oksit tabakası, korozyona karşı yüksek dayanım sağlar.

Paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri değiştirilerek farklı özelliklerde alaşımlar elde edilebilir. Krom miktarı yükseltilerek veya nikel, molibden gibi alaşım elementleri katılarak korozyon dayanımı artırılabilir. Bunun dışında bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum, azot, kükürt ve selenyum gibi elementlerin eklenmesi ile korozyon dayanımına ek olarak başka özellikler de kazandırılabilir [44].

Paslanmaz çeliklerde bulunan bazı elementlerin mikro yapı içerisindeki işlevleri aşağıda sıralanmaktadır:

Karbon: Kuvvetli östenit oluşturunca element olmakla beraber krom ile reaksiyona girerek taneler arası korozyona neden olmaktadır [45, 46]. Yüksek mukavemetli alaşımlara sertleştirme ve mukavemet artırıcı etki için katılmaktadır [47].

Krom: Ferrit oluşumunda etkili olup malzemenin korozyon direncini arttırmaktadır [46 – 49].

Nikel: Kuvvetli östenit yapıcıdır [46, 47]. Yüksek sıcaklık dayanımı ve malzemenin sünekliğini sağlar [48].

Azot: Paslanmaz çelik malzemelerde çok kuvvetli östenit oluşturunca olup, en az nikel elementi kadar etkilidir [46, 48]. Yüksek kromlu ve az karbonlu çeliklerde yüksek sıcaklıklardaki tane büyümesini önlemek için kullanılır [47].

Fosfor ve kükürt: Paslanmaz çeliklerin işlenebilme kabiliyetini arttırmakta olup, kaynak esnasında sıcak çatlak oluşumuna neden olduğundan paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetini sınırlamaktadır [46, 45]. Bu elementler paslanmaz çeliklerin kaynağında nüfuziyetin artmasına katkı sağlamaktadır [45].

Mangan: Oda sıcaklığı civarında östenitin kararlı olmasını sağlamakla beraber yüksek sıcaklıkta ferrit fazının oluşmasına neden olmaktadır [45]. Östenit yapıcıdır [46, 47].

Silisyum: Mikro yapı içerisinde % 1 oranından daha fazla olması durumunda ferrit ve sigma fazının oluşumunda etkili olmaktadır. Paslanmaz çelik malzemede oksit giderme amacıyla az miktarlarda eklenmektedir. Akışkanlığı kaynak esnasında banyonun akışkanlığını arttırmakta ve kaynak metalinin ana metalinin daha iyi ıslatılmasını sağlamaktadır [45, 47].

Bunlardan karbon, nikel, azot, mangan östenit yapıcı, krom, fosfor, kükürt, silisyum ferrit yapıcıdır [45].

2.3.2. Fiziksel ve mekanik özellikler

Paslanmaz çelikler ile diğer karbonlu çeliklerin sahip olduğu bazı fiziksel özellikler farklılık göstermektedir. Östenitik paslanmaz çeliğin sahip olduğu ısı iletkenliği diğer karbonlu çeliklerin 1/3'ü kadar olmasına rağmen ısı genleşme katsayıları % 50 kadar daha fazladır. Bu durum bu tür malzemelerin kaynak esnasında ısının bir yerde yoğunlaşması ve malzemelerin distorsiyon oluşturması gibi bazı problemlerin oluşmasına neden olmaktadır [49].

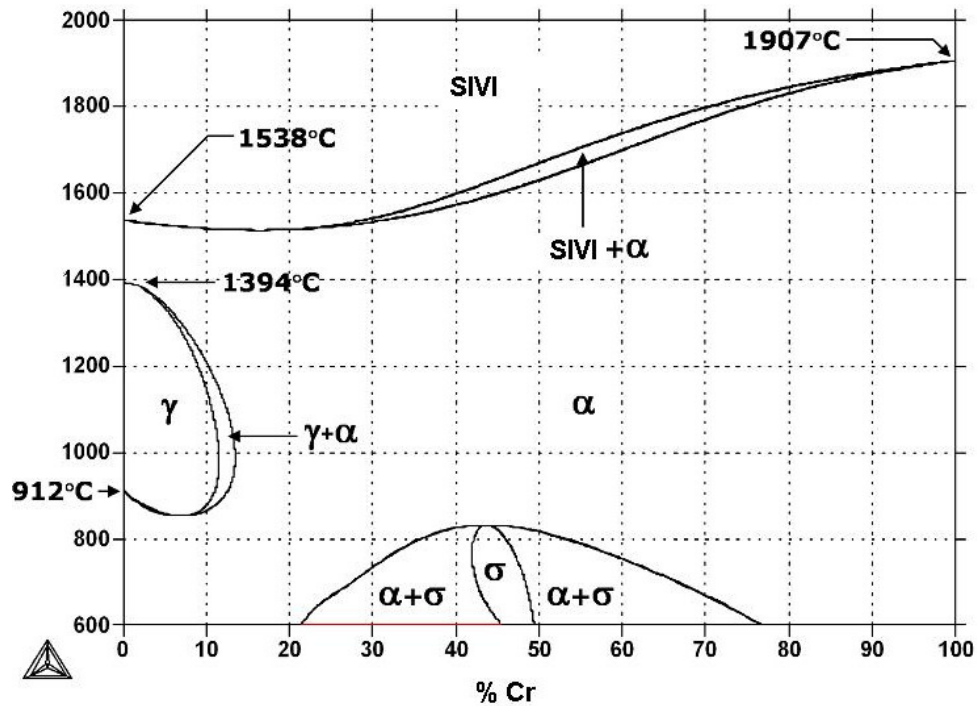
Paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri az alaşımlı çeliklerden farklılık göstermektedir. Bu tür çeliklerin sertleşme kabiliyetleri malzemenin içerdiği karbon miktarına bağlı olarak artmaktadır [48]. Çizelge 2.2, 304 paslanmaz çeliklere ait mekanik özellikleri göstermektedir.

Çizelge 2.2. 304 Paslanmaz çeliklere ait mekanik özellikler [50]

% 0,2 Akma Dayanımı	200 – 500 MPa
Çekme Dayanımı	500 – 700 MPa
Sertlik	140 – 190 HV

2.3.3. Faz diyagramları

Demir – krom sistemi paslanmaz çelikler grubunun temelini oluşturur. Krom, hacim merkezli kristal kafes yapısına sahip ferriti kararlı hale getirir. Şekil 2.8’de verilen Demir – krom denge diyagramında yüzey merkezli kristal kafes yapısına sahip östenitin oluşturduğu bölgeyi kapalı hale getirir [51].



Şekil 2.8. Demir – krom denge diyagramı [51]

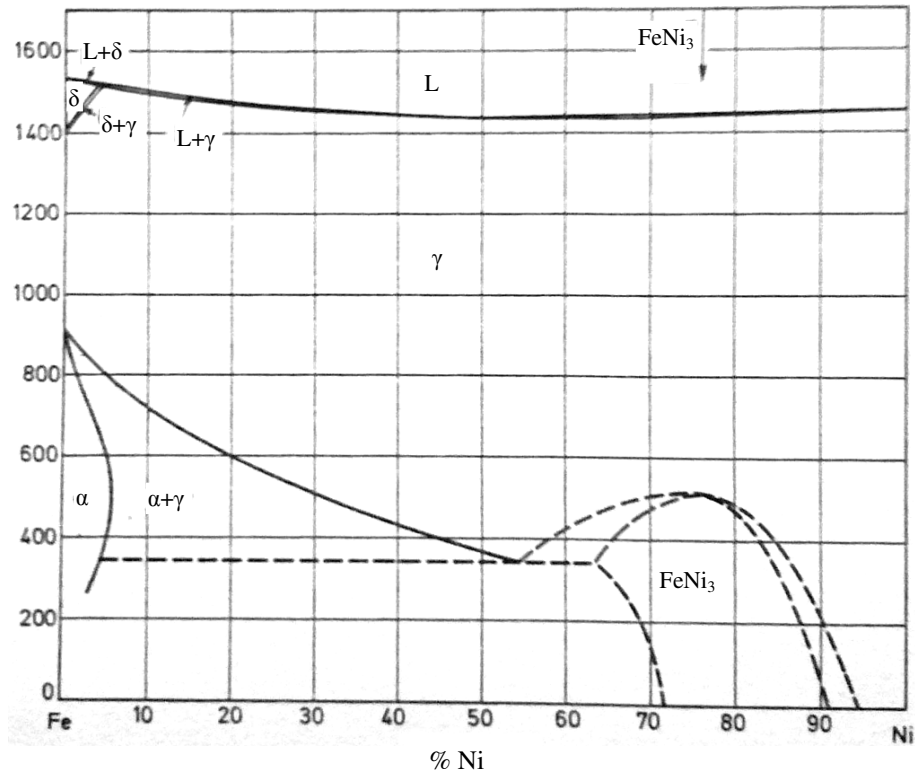
Saf demir – krom alaşımları % 12’den fazla krom içermeleri halinde sıvı halden itibaren katılaştıklarında hacim merkezli ferrit haline gelmektedir ve soğuma sırasında da hiçbir dönüşüm göstermemektedir. Bu olay kararlı östenit alanını da keskin bir şekilde sınırlandıran kromun ferrit oluşturma yeteneğinden kaynaklanmaktadır.

Diyagramın γ alanı alaşımın içerisindeki karbon miktarına bağlı olarak genişlemektedir. γ alanını genişleten diğer bir element de azottur. Çok kuvvetli birer östenit dengeleyici olan C ve N, γ alanını genişleterek östenit içinde kromun nrlğn arttırır.

Demir – krom denge diyagramının alt orta bölgesinde görülen σ fazı, tetragonal bir kafes yapısına sahiptir. Bu faz çok yavaş bir soğuma hızıyla 800 – 600 °C sıcaklık aralığında oluşur. σ fazı zaman zaman çeşitli ticari paslanmaz elik türlerinde, uzun süre belirli sıcaklıklara maruz kalma sonucu görülen sert ve gevrek metaller arası bir bileşiktir. Bu fazın demir – krom ikili alaşım sisteminde oluşum aralığı çok dardır.

Ticari paslanmaz elik alaşımlarının bileşiminde Si ve Mo gibi ferrit yapıcıların varlığı σ fazının oluşumunu hızlandırır ve var olduğu sıcaklık alanını da genişletir [51].

Krom miktarındaki artış östenit bölgeyi küçültür. Bununla birlikte uygun karbon miktarıyla bu çelikler, alaşımsız karbon çelikleri gibi sıcakta işlenebilir bir martenzitik yapı içerirler [52].



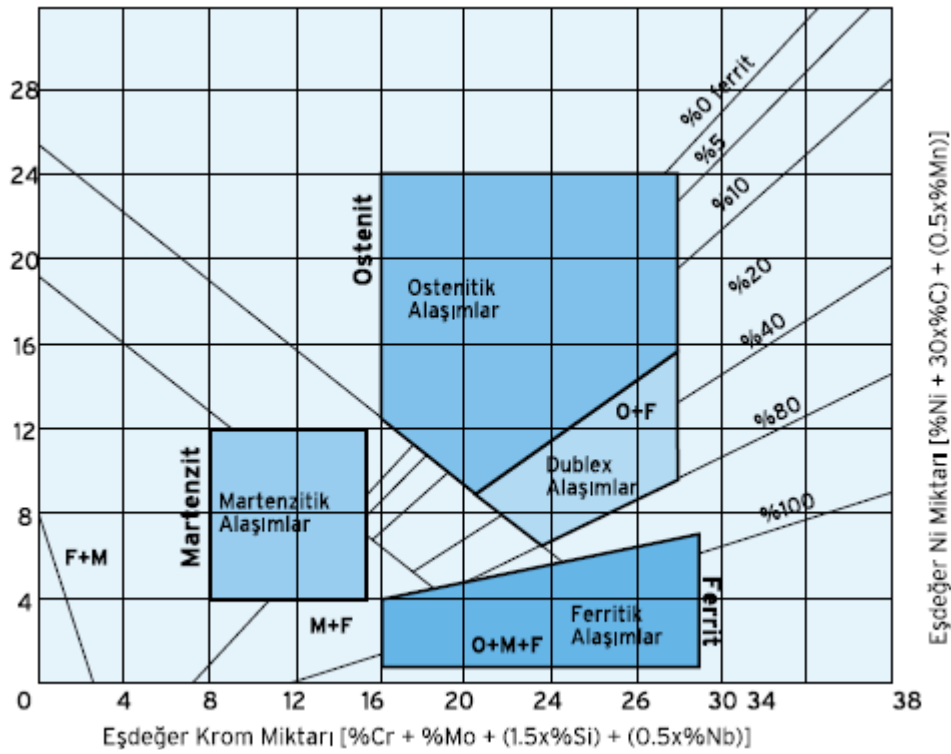
Şekil 2.9. Demir – nikel denge diyagramı [46]

Nikel içeriği %5 civarında olan eriyik östenit kristallerinin oluşumuyla katılaşmaya başlar. Delta ferrit içeriği Şekil 2.9’da görüldüğü gibi çok küçük bir alanı kapsar. 1400 – 1450 °C sıcaklıklarında katılaşmayla beraber delta ferritin östenite dönüşümü gerçekleşir. Nikel kuvvetli bir östenit yapıcıdır. Dolayısıyla Şekil 2.9’da görüldüğü gibi demir – nikel denge diyagramının büyük bir kısmı östenit fazını içerir [46].

2.3.4. Paslanmaz çelik türleri

Paslanmaz çelik alaşım elementleri etkinlik dereceleri ferrit dengeleyicileri ($Cr_{eş}$) östenit dengeleyici ($Ni_{eş}$) şeklinde gruplayarak değerlendirilmektedir [49]. Buna göre, paslanmaz çeliklerde içyapıyı belirleyen en önemli alaşım elementleri önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır. Bunlardan öncelikle krom ve nikel içyapının ferritik veya östenitik olmasını belirler. Şekil 2.10’da verilen Schaeffler diyagramı çeşitli paslanmaz çelik kalitelerinin bileşim açısından yerini ve oluşan içyapılarını gösterir. Ferrit stabilizatörleri; ferrit faz alanını genişleten silikon,

krom, molibden, vanadyum, niyobyum ve titanyum gibi karbür oluşturan metallere. Östenit stabilizatörleri ise; östenit faz alanını genişleten nikel, mangan, karbon ve nitrojen gibi elementlerdir [50].



Şekil 2.10. Schaeffler diyagramı [50]

Ferritik paslanmaz çelikler

Ferritik çelikler hem oda sıcaklığında hem de daha yüksek sıcaklıklarda demir elementinin sahip olduğu hacim merkezi kübik kristal yapısına sahiptirler ve östenit ferrit dönüşümü göstermezler. Dolayısıyla içyapılarını ve mekanik özelliklerini ısı işlemleriyle etkilemek mümkün değildir. Düşük toklukları ve gevrekleşme hassasiyetleri nedeniyle, makine parçası olarak kullanımları özellikle kaynaklı montajlar ve kalın kesitler için sınırlıdır. Atmosferik korozyona ve oksidasyona karşı olan dayanımları ise önemli avantajlarıdır. Ferritik çelikler manyetikler ve ısı işlemleriyle mekanik özellikleri değiştirilemediğinden iyi bir dayanıma sahip olmaları için ince taneli bir içyapıya sahip olmaları şarttır. Ferritik çelikler %10,5 ile 30 arasında krom ve az miktarda karbon, azot ve nikel gibi östenit yapıcı elementler

ihativa ederler. Ferritik eliklerin kullanım yerleri tamamen krom miktarına bağlıdır [50].

Östenitik paslanmaz elikler

Gerek kullanım, gerekse alaşım kalitelerinin çokluğu açısından en zengin grup östenitik çeliklerdir. Manyetik olmayan bu çelikler hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda yüzey merkezli kübik kafese sahip östenitik içyapılarını koruduklarından, normalleştirme ve sertleştirme ısıl işlemleri yapılamaz. Tavlanmış halde süneklikleri, toklukları ve şekillendirilebilme kabiliyetleri düşük sıcaklıklarda bile mükemmeldir. Mukavemetleri ancak soğuk şekillendirme ile artırılabilir. Östenitik paslanmaz çelikler genellikle %16 ile %26 krom içerirler. Nikel ve mangan temel östenit oluşturucularıdır.

Mükemmel şekillendirilebildiği, sünekliği ve yeterli korozyon dayanımı ile AISI 304 östenitik paslanmaz çelikler en yaygın olarak kullanılanlardır. Bu eliklerde korozyonu önlemek için gerekli olan kromun ferrit yapıcı etkisi, östenit yapıcı alaşım elementleri katılarak giderilir. Kuvvetli bir östenit yapıcı olmasına karşın karbon miktarı artırılmaz, çünkü bu element karbür oluşturarak korozyon dayanımını zayıflatır. Bunun yerine aynı zamanda oksitleyici ve indirgeyici asitlere de dayanıklı olan nikelden yararlanılır.

Östenitik paslanmaz çeliklerde mukavemeti artırmak için genellikle soğuk şekillendirmeden yararlanılır. Bu eliklerde pekleşme, ferritiklerden daha fazladır. Bu arada şekil değiştirmeden dolayı martenzit de oluşabilir ve malzeme manyetiklik kazanır. Mukavemeti artırmak için bir diğer yol da alaşımlama yapmaktır. Bu açıdan karbon ve azot en etkili elementlerdir.

Kükürtsüz olan korozif ortamlarda östenitik çelikler, ferritiklerden daha iyi sonuç verirler. Molibden katılması ile organik ve çeşitli mineral asitlere karşı dayanımları artar. Tam östenitik çelikler ısıya ve asitlere dayanıklı, yüksek sıcaklık özellikleri iyi olan malzemelerdir. Ancak sıcak yırtılma eğilimi gösterirler.

Östenitik çelikler sünek ve toktur, ayrıca ısı etkisiyle sertleşmediklerinden, kaynak bağlantıları için uygundur, ancak ısınan ve soğuyan bölgede karbür çökmesi oluşmaması için stabilize edilmiş türleri seçilmelidir. Öte yandan ısı iletimleri düşük, genleşmeleri yüksek olduğundan kaynakta çarpılmayı önlemek için ısı girdisi düşük tutulmalıdır.

Östenit fazı içeren çeliklerde en büyük sorun, krom karbür çökmesidir. Kritik sıcaklıklar olarak nitelenen 400 ile 850°C arasında yüksek enerjili tane sınırları boyunca ayrılarak yan yana dizilen kromca zengin karbürler, malzemenin korozyon ortamlarında bulunması halinde taneler arası korozyona ve tane ayrılmasına yol açarlar. Bunun nedeni karbür bünyesine geçen krom nedeniyle, katı çözeltideki krom miktarının korozyona dayanıklılık sınırı olan %12'nin altına düşmesidir [50].

Martenzitik paslanmaz çelikler

Martenzitik çelikler, yüksek sıcaklıklarda sahip oldukları yüzey merkezli kübik kafese sahip östenitin hızlı soğuma sonucu hacim merkezli tetragonal kafese sahip martenzit yapıya dönüşümü ile elde edilir. Bu çeliklerin içyapısında tavllanmış halde yumuşak ferritik faz da bulunur. Bu gruptaki çelikler en çok %14 krom içerirler. Krom ve karbon miktarları martenzit oluşumunu sağlayacak şekilde dengelenir.

İstenen içyapı ve özellikleri elde etmek için martenzitik çeliklerin alaşım çeliklerine benzer biçimde ısıtılma işlemi (yani östenitleme, su verme ve temperleme) tabii tutulmaları gerekir.

Martenzitik çelikler yüksek çekme, sürünme ve yorulma dayanımı gerektiren, orta derecede korozyon ve en çok 650°C'a kadar sıcaklıktaki uygulamalarda tercih edilirler. Martenzitik çelikler petrol ve petrokimya makine teçhizatında da kullanılır. Cerrahi ve dişçilik aletlerinin, makas, yay, kam ve rulman bilyelerinin en çok tercih edilen malzemeleridir [50].

Martenzit dönüşümünün başlangıç sıcaklığı paslanmaz çeliklerin içerdiği alaşım elementlerinin ağırlıkça yüzdeleriyle Eş. 2.1’de verildiği gibi hesaplanır.

$$M_s = 492 - 125x\%C - 65,5x\%Mn - 10x\%Cr - 29x\%Ni \quad (2.1)$$

Bu eşitlikle elde edilen sıcaklık değeri $\pm 20^\circ\text{C}$ aralığında farklılıklar gösterebilir [46].

Östenitik – ferritik (dubleks) paslanmaz çelikler

Dubleks çelikler olarak da adlandırılan bu çeliklerin içyapısında her iki faz bir arada bulunur ve bu sayede östenitik ve ferritik çeliklerin her birinin de ötesinde iyileştirilmiş özellikler gösterirler. Böylece östenitik çeliklere kıyasla daha iyi gerilme korozyonu dayanımına; ferritik çeliklerle kıyaslandığında ise daha iyi tokluk ve sünekliğe sahip olurlar.

Östenitik – ferritik çelikler ferrit yapıcı elementlerin oranına bağlı olarak %10’a kadar delta – ferrit içerirler. İlk önce katılacak bu faz, içyapının ince taneli olmasını sağlar.

Genellikle petrol, petrokimya, kimyasal teçhizat imalatında, arıtma tesislerinde ve deniz teknolojisinde kullanılır. Kaynaksız halde 280°C , kaynaklı halde ise 250°C sıcaklıklara kadar güvenle kullanılabilirler [50].

Çökelme sertleşmesi uygulanabilir paslanmaz çelikler

Bu çeliklere çökelme sertleşmesi (yaşlandırma) uygulanabilir. Bunların esas içyapıları östenitik, yarı – östenitik veya martenzitik olabilir. Bu çelikler çok düşük miktarda karbon ihtiva ettiklerinden martenzitik türlerinde bile temel sertleşme ancak çökelmeye bağlı olarak gerçekleşir [53].

2.3.5. Paslanmaz eliklerin kullanım alanları

Paslanmaz elikler türlerine göre, mutfak eşyaları, ev aletleri, kimya ve petro – kimya sektörü, gıda sektörü, otomotiv sanayi, eşanjör ve boyler üretimi, kâğıt sanayi, deri sanayi, kazan yapımı, havacılık endüstrisi gibi alanlarda uygulamalara sahiptir [44].

2.3.6. Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağı

Paslanmaz eliğın kaynağında kendini çekme olayı sade karbonlu çeliklerin kaynağına göre daha fazladır. Kaynak dikişinin soğuması esnasında büyük oranda büzülme meydana gelmekte böylece kaynaklı bölgede oluşan şiddetli gerilmeler çatlama tehlikesine yol açmaktadır [53].

Östenitik paslanmaz çeliklerin sahip olduğu düşük ısı ve elektrik iletkenliğı kaynak açısından genellikle yararlı olup kaynak esnasında düşük ısı girdisi ile çalışması tavsiye edilmektedir. Çünkü oluşan ısı, kaynak bölgesinden, düşük karbonlu çekirdekte olduğu gibi hızlı bir şekilde uzaklaşmamaktadır. Malzemenin direnci yüksek olduğundan direnç kaynaklarında düşük akım değerleri ile kaynak yapılabilmektedir [54].

Östenitik paslanmaz çelikler iyi korozyon direnci göstermektedir. Kaynakla birleştirilen paslanmaz elik imalatlarında %90’dan daha fazlasında östenitik paslanmaz çeliklerin kullanılmasının en önemli nedenlerinden biri bu tip çeliklerin iyi kaynaklanabilirlik özelliğı ve kaynak sonrasında ana metalle karşılaştırılabilecek derecede kimyasal bileşimlere ve mekanik özelliklere sahip olmasıdır. Östenitik paslanmaz çelikler çeşitli kaynak yöntemleri kullanılarak kolaylıkla kaynak edilebilirler [55]. Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak edilerek birleştirilmesinde daha önceden bahsedilen fiziksel özellikleri dikkate alınması gerekli olup, bu özelliklerin yanında bir dizi metalürjik etkenler de bu tip paslanmazın kaynağında önemli rol oynamaktadır. Bunlar; δ -ferrit oluşumu, taneler arası korozyona duyarlılık, gerilmeli korozyona duyarlılık ve sigma fazının oluşmasıdır [55–57].

Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında genelde üç temel problemle karşılaşılır. Bunlar;

- Krom karbür çökmesi ve taneler arası korozyon,
- Sıcak çatlak oluşumu,
- Sigma fazı oluşumudur.

Krom karbür çökmesi ve taneler arası korozyon

Paslanmaz çelikler üretimleri esnasında krom ve karbürün östenit içerisinde çözüldüğü 1100 °C'den hızla soğutulduklarında bu elementlerin çökme tehlikesi ortadan kalkmış olmakta ve oda sıcaklığında karbonun difüzyon hızı çok düşük olduğundan, paslanmaz çeliklerin kullanımı esnasında krom karbür oluşmamaktadır. Ancak sıcaklığın 450 °C'nin üzerine çıkması ile karbonun difüzyon hızı karbonun tane sınırlarında biriken karbonun kroma karşı olan yüksek ilgisi nedeniyle bu bölgede krom ile birleşerek krom karbür $[(FeCr)_{23}C_6]$ oluşturmaktadır. Oluşan krom karbürün ağırlık olarak % 90'ını krom oluşturduğundan tane sınırlarında bulunan çok az orandaki karbon bile östenit tanelerinin çevresindeki krom miktarını aşırı derecede azaltır. Bu olay sonucunda paslanmaz çelik malzemeler koroziv bir ortamda bulunduğunda kromca zayıflamış olan tane sınırlarında korozyon oluşmaktadır. Bu şekilde ortaya çıkan taneler arası korozyon paslanmaz çelik malzemeyi çok kısa bir süre içerisinde kullanılmaz hale getirmektedir. Paslanmaz çelik malzeme içerisinde karbon miktarının artışına paralel olarak bu olay şiddetlenmektedir [56].

Östenitik paslanmaz çeliğin kaynağı esnasında eriyen bölge çok kısa bir süre içerisinde katılaştığından kaynak dikişi için karbür çökme tehlikesi yoktur. Ancak ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) kaynak süresi boyunca, 500–900°C sıcaklık aralığında tavlı olarak kalmakta ve aynı zamanda karbon içeriğinin yüksek olması halinde östenit tane sınırları içerisinde taneler arası korozyona neden olan karbür çökmesi meydana gelmektedir [45].

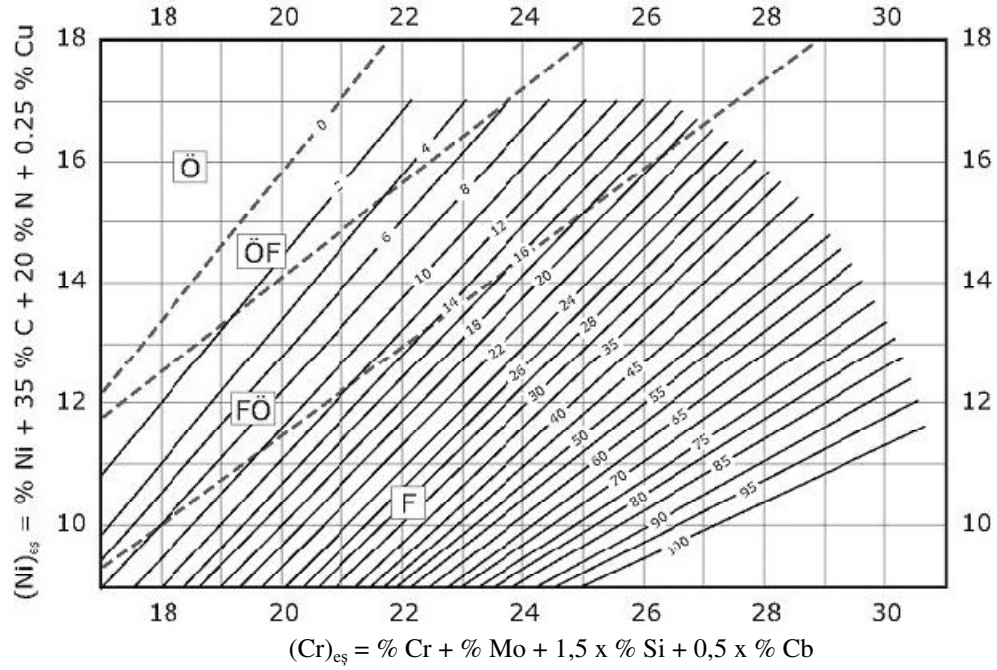
ITAB veya esas metalde krom karbür çökmesi meydana geldiğinde parça 1100 °C dereceye kadar tavlınır su içinde yeniden soğutulduğunda yüksek sıcaklıkta östenit fazı içerisinde çözülmüş bulunan karbürler hızlı bir soğuma esnasında tekrar oluşamazlar. Pratikte böyle bir işlemin uygulanması zor olduğundan krom karbür çökmesine eğimli olan % 0,03'ten fazla karbon içeren östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında kaynakçının alacağı en iyi önlem kaynak dikişini çektikten hemen sonra kaynak edilen parçayı ıslak bir bez ile hızla soğutmasıdır [56, 58].

Sıcak çatlak oluşumu

Östenitik paslanmaz çeliklerin üretimleri esnasında sıvı halden katılaşma başladığında yapı içerisinde östenit ve ferrit taneleri oluşmaya başlar δ – ferrit katılaşma esnasında meydana gelen ferrit olup bu yapı östenitin normal dönüşümü sonucunda oluşan ferrit değildir. Katılaşma esnasında östenit taneleri arasında serpilmiş δ – ferrit tanecikleri oluşur. Oluşan bu faz, krom ve ferriti dengeleyen elementler yönünden zengin, nikel ve östeniti dengeleyen elementler yönünden fakirdir. Bu faz sıcak şekil değiştirmeyi zorlaştırdığından malzemede sıcak çatlak oluşumunu teşvik etmektedir. Sıcak çatlamanın temel nedeni; kükürt ve fosfor gibi elementlerin oluşturduğu ve tane sınırlarında toplanma eğilimi yüksek olan düşük ergime sıcaklığına sahip metalik bileşimlerdir. Bahsedilen bu bileşimler kaynak sonrasında kaynak dikişinin içinde veya ısı tesiri altında kalan bölgede bulunduğu, tane sınırlarına doğru yayılmakta ve kaynak dikişinin soğuması esnasında çekme gerilimleri oluştuğunda sıcak çatlamalara neden olmaktadır [45].

Sıcak çatlama riskine karşı dayanım elde edebilmek için yapıdaki ferrit miktarının en az %4 olması önerilmektedir. Bunun dışında; dolgu malzemesinin ve ana metalin kimyasal analizi biliniyorsa, çeşitli diyagramlar kullanılarak da bir tahminde bulunmak mümkündür. Bunlardan Schaeffler diyagramı çok uzun yıllar kullanılmasına karşın, azotun etkisini hesaba katmaması nedeniyle günümüzde etkinliğini kaybetmiştir. Günümüzde en sık kullanılan ve en sağlıklı sonucu veren diyagram Şekil 2.11'de gösterilen Delong diyagramıdır. Bu diyagramı Schaeffler Diyagramı'ndan ayıran en önemli özellik nikel eşdeğeri hesaplanırken yapıdaki azot

miktarının da göz önüne alınması ve sonucun ferrit yüzdesine ek olarak Ferrit Numarası ile belirtilmesidir [45].



Şekil 2.11. Delong diyagramı [59]

Ferrit numarası diyagramının nikel eşdeğerini gösteren ekseninden sağa doğru yatay, krom eşdeğerini gösteren ekseninden yukarıya doğru dikey çizgiler çizilerek bulunur. Yatay ve dikey doğruların kesiştiği noktadan geçen çapraz çizgiler ferrit numarasını vermektedir [45].

Sigma fazı oluşumu

Östenitik paslanmaz çeliklerde diğer bir problemde bazı hallerde sigma fazı adı verilen metaller arası krom – demir bileşiğine rastlanmasındır. Bu bileşik östenitik paslanmaz çelik kaynağında dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur. Sigma fazı, çok sert (700–800 HV), manyetik olmayan ve gevrek yapıya sahip metaller arası bileşiktir [54].

Sigma fazı kaynak bölgesinde oluşmaktadır ve saf östenit bir yapıda sigma fazının oluşum hızı östenit yapı içerisinde ferrit bulunan yapıya oranla daha düşüktür [46]. Saf östenitik yapı bir malzeme belirli bir sıcaklık aralığında tavlendiğinde önce karbür ayrışması meydana gelmekle ve karbürler kendilerine çok yakın olan krom ve molibden gibi büyük atom grupları bakımından kendilerini zenginleştirmektedir. Oluşan ferrit bahsedilen sıcaklıkta dengede olmadığından yeni bir faza dönüşmektedir. Bu faz sigma fazıdır. Yapılan çeşitli araştırmalar sigma fazı dönüşümü 750°C'de 30 saat sürede olmaktadır. Buna karşılık 650°C'de bu fazın dönüşümü için 170 saat süre gerekmektedir. Sigma fazının oluşumu soğuk şekillendirme ile hızlanmakta olup oluşuma molibden, krom, niyobyum, silisyum kuvvetli bir şekilde tesir etmektedir.

Sigma fazı 950–1050°C sıcaklıklar arasında belirli bir süre tavlandıktan sonra soğutularak giderilmektedir. Sigma fazının neden olduğu gevrekleşme kaynak metalinin ve kaynak yerinin tavlama tabi tutulmadan önceki içerdiği ferrit miktarına bağlıdır [60].

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Kullanılan Malzeme

Bu çalışmada AISI 304 paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Mukavemetinin, sertliğinin, sünekliğinin ve korozyona karşı dayanımının yüksek olması, düşük ısı iletimine ve yüksek elektrik direncine sahip olması gibi fiziksel ve mekanik özellikleriyle makine ve imalat sanayinde birçok uygulamada kullanılması nedeniyle tercih edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de, mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Çizelge 3.3 ise AISI 304 paslanmaz çeliklerin genel fiziksel özelliklerini göstermektedir.

Çizelge 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin kimyasal bileşimi

Element	C	Si	Mn	Ni	Cr	N	S	P
% Ağırlık	0,047	0,48	1,14	8,09	18,22	0,062	0,003	0,026

Çizelge 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin mekanik özellikleri

Çekme dayanımı	692 MPa
Akma dayanımı (% 1)	370 MPa
Akma dayanımı (% 0,2)	345 MPa
Uzama (50 mm)	% 46
Sertlik	185 HV

Çizelge 3.3. AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin genel fiziksel özellikleri [50]

Yoğunluk	8,00 g/cm ³
Erime noktası	1400 – 1450 °C
Elastik modül	193 GPa
Elektriksel geçirgenlik katsayısı	0,072 x 10 ⁻⁶ Ωm
Isı iletim katsayısı	16,2 W/mK
Genleşme katsayısı	17,2 x 10 ⁻⁶ /K

Şekil 2.11’de verilen Delong diyagramına göre malzemeye ait krom eşdeğeri %18,94, nikel eşdeğeri %10,975 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin diyagramda karşılık geldiği ferrit miktarı %8,4 civarındadır.

Şekil 2.10’da verilen Schaeffler diyagramına göre malzemeye ait krom eşdeğeri %18,94, nikel eşdeğeri %9,5 olarak hesaplanmıştır. Diyagramda bu değerler, östenit, martenzit ve ferrit bölgesine karşılık gelmektedir.

3.2. Uygulanan Yöntemler

3.2.1. İş parçası hazırlama

Deneysel çalışmada kullanılan malzeme İzmir Çamdibi’nde bulunan Çeltaş Çelik A.Ş.’den sac levha şeklinde temin edilerek İzmir Pınarbaşı’nda bulunan Özçe Demir Çelik A.Ş.’nin atölyesinde CO₂ lazer kesme tezgâhında 50x40 mm ebatlarında kesilmiştir. Lazerle kesme işleminin tercih edilmesindeki neden pürüzsüz, küt bir birleştirme yüzeyine ihtiyaç duyulmasıdır. CO₂ lazer kaynak yönteminde dolgu metali kullanılmadığından alın kaynağı yapılarak birleştirilecek iş parçalarının yüzeyleri birbirlerine tam temas etmelidir. Aksi takdirde lazer ışını, oluşan boşluklardan geçerek parça yüzeyine temas etmeyecek, enerjisini iş parçasına aktaramayacaktır.

Kaynak işlemi sırasında birleşme doğrultusunda boşluklarla karşılaşmamak amacıyla her bir iş parçasının tüm yüzeyleri dikkatle kontrol edilmiş, uygun olmayanları kullanılmamak üzere ayrılmıştır.

Malzeme üzerinde bulunan yağ, kir gibi çeşitli maddelerin kaynak işlemi sırasında çözünerek kaynak metaline karışması ve kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemesi ihtimaline karşı her bir iş parçasının yüzeyi tel fırçayla temizlenmiş, kaynak işlemine uygun olmayan iş parçaları kullanılmamak üzere ayrılmıştır.

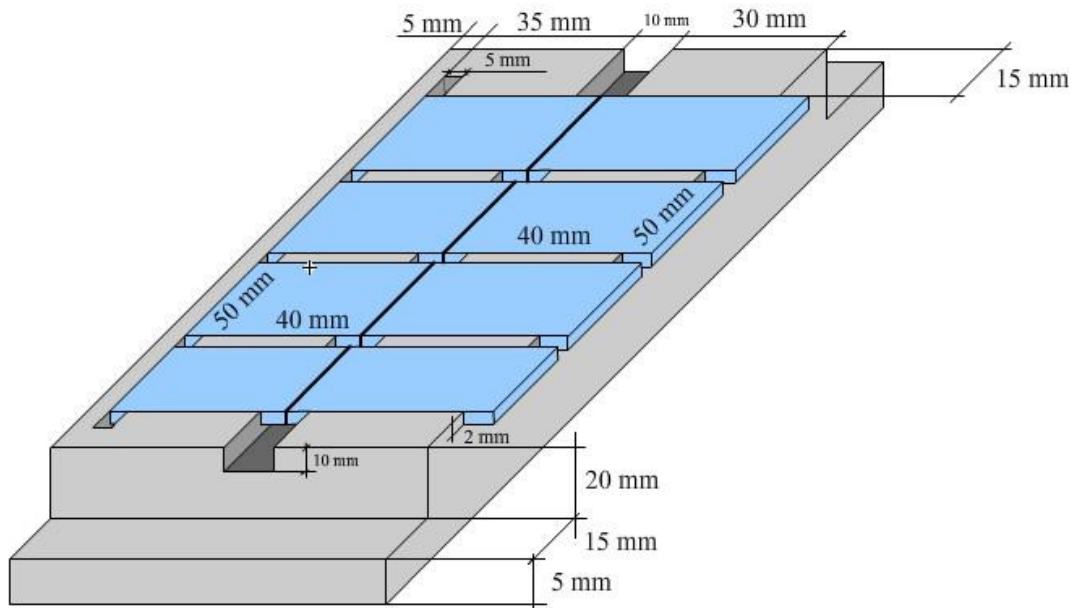
3.2.2. CO₂ lazer kaynak yöntemi

Birçok endüstride yaygın olarak kullanılan CO₂ lazer kaynak yöntemi, sağladığı avantajları ve verimli sonuçları nedeniyle bu çalışmada kullanılmıştır. Kalıp tasarımı ve üretimi yapıldıktan sonra önceden hazırlanan 304 paslanmaz çelik iş parçaları CO₂ lazer kaynak tezgâhında birleştirilmiştir.

Kalıp tasarımı ve üretimi

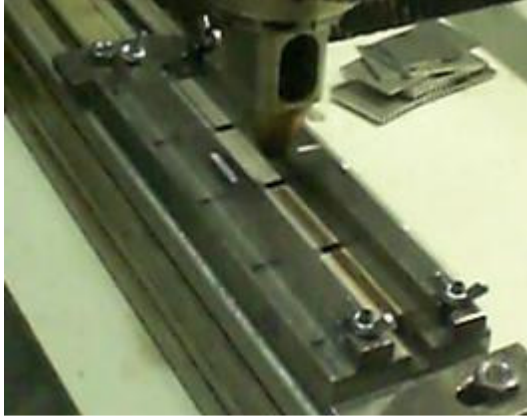
CO₂ lazer kaynak üniteleri ve tezgâhlarının endüstride kullanımları oldukça maliyetlidir. Bu maliyeti en aza indirmek ve kaynak işlemlerini hızlı yapmak amacıyla özel bir kalıp tasarlanmıştır.

Kalıbın tasarımında tek seferde dört kaynak işleminin yapılması, iş parçalarının kolaylıkla yerleştirilmesi ve sabitlenmesi amaçlanmıştır. Kalıba her bir seferde sekiz adet iş parçası bağlanarak dört adet kaynaklı birleştirme elde edilmektedir. Bu işlem, imalat süresini ve dolayısıyla maliyeti azaltmaktadır.



Şekil 3.1. Kalıp modeli

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi iş parçaları kalıbın bir kenarına dayalı konumdadır. Kalıbın diğer kenarından serbest konumda olan iş parçalarına uygulanan kuvvetle alın altına birleştirme tamamlanmaktadır. Resim 3.1’de görüldüğü gibi 10x10 mm kesitindeki çubuklar kelebek somunlar vasıtasıyla sıkıştırılarak iş parçalarını yüzeyden sabitlemektedir.



Resim 3.1. Lazer kaynak yönteminde kullanılan kalıp

Kaynak işleminin uygulanacağı doğrultuda, kalıp içerisinde, 10x10 mm kesitinde kanal açılmıştır. Bu uygulamayla tam nüfuziyet durumunda kalıbın ve kaynak metalinin zarar görmemesi amaçlanmıştır.

İzmir Çamdibi’nde Çeltaş Çelik A.Ş. tarafından temin edilen kalıp malzemesi, İzmir 1. Sanayi sitesinde bulunan Uzay Kalıp tarafından talaşlı imalat tezgâhlarıyla işlenmiştir.

Lazer ünitesi ve kaynak tezgâhı

Bu çalışmada İstanbul Gebze’de bulunan Formaks A.Ş.’ye ait Trumpf marka Truflow 4000 model CO₂ lazer ünitesi kullanılmıştır. Bu ünitenin maksimum lazer çıkış gücü 4 kW’tır. Sürekli mod lazer ünitesinde yapılan kaynaklı birleştirme işlemi Trumpf marka Lasercell 1005 model kaynak tezgâhında yapılmıştır. Bu tezgah, x, y, z doğrusal eksenleri ve b, c açısal eksenleriyle 5 eksenli hareket kabiliyetine

sahiptir. Kaynak tezgahının çalışma eksen aralıkları ve hızları Çizelge 3.4'te verilmektedir.

Çizelge 3.4. Trumpf marka Lazercell 1005 model kaynak tezgahına ait teknik bilgiler

LASZERC L 1005	Çalışma Ekseni	Eksen Aralığı	Maksimum Hız
	X	4000 mm	50 m/dk
	Y	1500 mm	50 m/dk
	Z	750 mm	30 m/dk
	B	360°	360°/s
	C	120°	120°/s



Resim 3.2. Trumpf marka Truflow 4000 model CO₂ lazer ünitesi ve Lazercell 1005 model kaynak tezgahı

Bu çalışmada kullanılan odak mesafesi 200 mm'dir. Tüm kaynak işlemleri bu odak mesafesinde yapılmıştır. Bu değer, Trumpf firması yetkililerinin bu tezgâhtaki lazer kaynak uygulamaları için belirlediği en verimli değerdir.



Resim 3.3. Trumf marka Lazercell 1005 model kaynak tezgahı

Kaynak parametreleri

Bu çalışmada kullanılan parametreler lazer gücü, kaynak hızı ve koruyucu gaz debisidir. Çalışmalar 1000, 2000, 3000 ve 4000 W lazer gücü, 100, 200, 300 ve 400 mm/dk kaynak hızı, 10, 12, 14, 16 l/dk koruyucu gaz debisiyle yapılmıştır. %50 Ar ve %50 He karışımından oluşan koruyucu gaz kullanılmıştır.

Her işlem için yalnız bir parametre değeri değiştirilmiştir. Her farklı işlem için belirli bir sıra takip edilmiş ve elde edilen numuneler bu sıraya göre numaralandırılmıştır. Çizelge 3.5'te CO₂ lazer kaynak yönteminde uygulanan parametre değerleri verilmektedir.

Çizelge 3.5. CO₂ lazer kaynak yönteminde uygulanan parametre değerleri

Numune No	Koruyucu gaz Debisi (l/dk)	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/dk)	Numune No	Koruyucu gaz Debisi (l/dk)	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/dk)
01	10	1000	100	33	14	1000	100
02			200	34			200
03			300	35			300
04			400	36			400
05		2000	100	37		2000	100
06			200	38			200
07			300	39			300
08			400	40			400
09		3000	100	41		3000	100
10			200	42			200
11			300	43			300
12			400	44			400
13		4000	100	45		4000	100
14			200	46			200
15			300	47			300
16			400	48			400
17	12	1000	100	49	16	1000	100
18			200	50			200
19			300	51			300
20			400	52			400
21		2000	100	53		2000	100
22			200	54			200
23			300	55			300
24			400	56			400
25		3000	100	57		3000	100
26			200	58			200
27			300	59			300
28			400	60			400
29		4000	100	61		4000	100
30			200	62			200
31			300	63			300
32			400	64			400

Kaynak işlemi sırasında malzemeye aktarılan ısı miktarı, lazer gücü ve kaynak hızı parametreleriyle değişim göstermektedir. Malzemeye aktarılan ısı miktarı Eş. 3.1’le hesaplanır [61].

$$Q = P/S \quad (3.1)$$

Burada, malzemeye aktarılan enerji miktarı Q, lazer gücü P ve kaynak hızı S ile gösterilmektedir.

$$Q \frac{[kJ]}{[cm]} = \frac{P[W].[dk]}{S[mm]} \times \frac{1[kW]}{1000 [W]} \times \frac{1[sa]}{60[dk]} \times \frac{10[mm]}{1[cm]} \times \frac{3600[kJ]}{1[kWsa]} \quad (3.2)$$

Eş. 3.2’de yapılan birim analizi neticesinde malzemeye aktarılan ısı miktarı

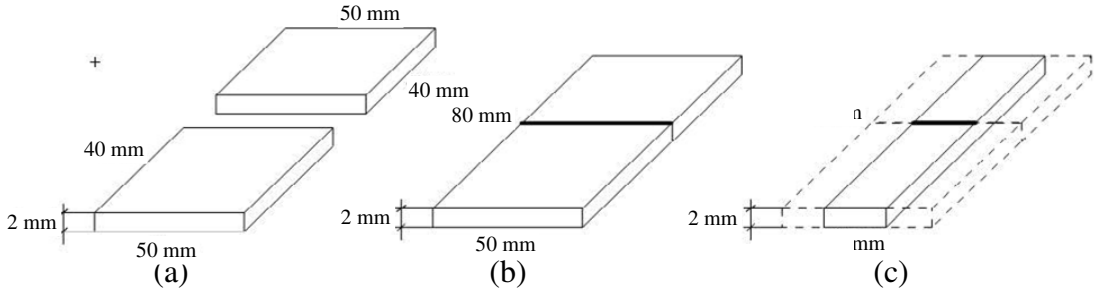
$$Q = 0,6xP/S \quad (3.3)$$

olarak belirlenir. Eş. 3.3’te de görüldüğü gibi lazer gücü arttıkça ısı girdisi artmakta, kaynak hızı arttıkça ısı girdisi azalmaktadır. Isı girdisinin kaynak parametreleriyle olan bu ilişkisi deney sonuçlarının incelenmesinde ele alınmaktadır.

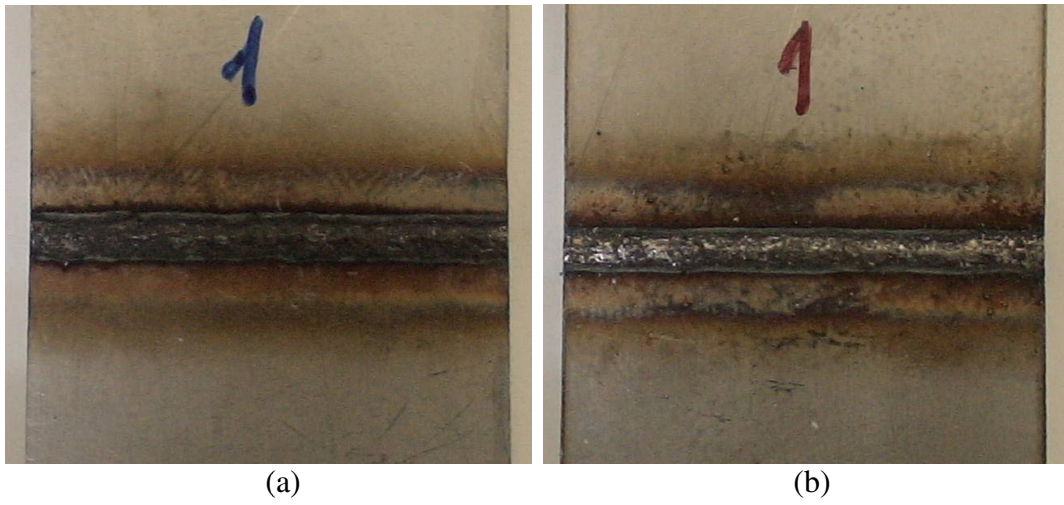
3.2.3. Deneysel numune hazırlama

İş parçalarının CO₂ lazer kaynağıyla birleştirilmesiyle elde edilen kaynaklı numuneler, deneysel çalışma sırasında uygulanacak test ve incelemelere uygun olmaları için, Şekil 3.2’de görüldüğü gibi 20x80 mm ebatlarında kesilmiştir. Bu işlemde kaynak metale zarar vermemek ve düzgün bir kesim yüzeyi elde etmek amacıyla lazer kesim yöntemi tercih edilmiştir.

Lazer kaynak yönteminde anahtar deliği oluşumu nedeniyle kaynak başlangıç ve bitiş noktalarında nüfuziyet eksikliği görülür. Bu olumsuzluğun giderilmesi amacıyla iş parçalarının her iki kenarından 15 mm boşluk bırakılarak numuneler kaynak dikişinin tam ortasından alınmıştır. Bu numunelerde kaynak dikişi homojen yapıdadır. Resim 3.4’te CO₂ lazer kaynak işlemi sonucunda oluşan örnek kaynak dikişi görülmektedir. Tüm numunelerde tam nüfuziyet meydana gelmiştir.



Şekil 3.2. Numune alma a) kaynak işlemi öncesi, b) kaynak işlemi sonrası c) alınan numune yeri ve ebadı



Resim 3.4. 1 numaralı numuneye ait kaynak dikişi görüntüsü (a) üst yüzey, (b) alt yüzey

3.2.4. Metalografik incelemeler

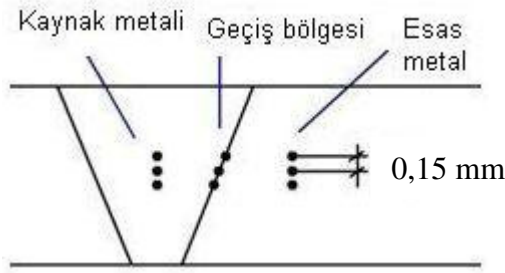
Kaynak bölgesinin metalografik incelemeleri için her bir kaynak metaline sırasıyla yüzey temizleme ve dağlama işlemleri uygulanmıştır. Dağlama sıvısı olarak 5 ml HNO_3 , 15 ml HCl kullanılmıştır. TOBB Üniversitesi'nin Ankara Söğütözü'nde bulunan Mühendislik Fakültesi laboratuvarında yapılan incelemede her bir kaynak metalinin 5x, 10x ve 50x büyütme oranlarında optik mikroskop görüntüsü alınmıştır.

Optik mikroskopla elde edilen görüntüler Adobe Photoshop programında incelenerek her bir numuneye ait kaynak dikişi genişliği ölçülmüştür. Bu ölçümler kaynağın üst yüzeyinden kaynak metali ve geçiş bölgesini içine alacak şekilde yapılmıştır.

3.2.5. Vickers mikro sertlik ölçümü

Vickers mikro sertlik ölçümü tepe açısı 136° olan kare tabanlı piramit elmas uç kullanılarak 9,807 N yükte, 15 saniye süre ile yapılmıştır. Yük kaldırıldıktan sonra meydana gelen izin köşegenleri ölçülerek sertlik hesaplanmıştır.

Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi laboratuvarında yapılan mikro sertlik ölçümleri kaynak metali, geçiş bölgesi ve esas metal olmak üzere üç farklı bölgede yapılmıştır. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi dikey ekseninde 0,15 mm aralıklarla her bir bölgede üçer adet ölçüm yapılmıştır. Elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak o bölgeye ait sertlik belirlenmiştir.



Şekil 3.3. Mikro sertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgeler

3.2.6. Üç nokta eğme deneyi

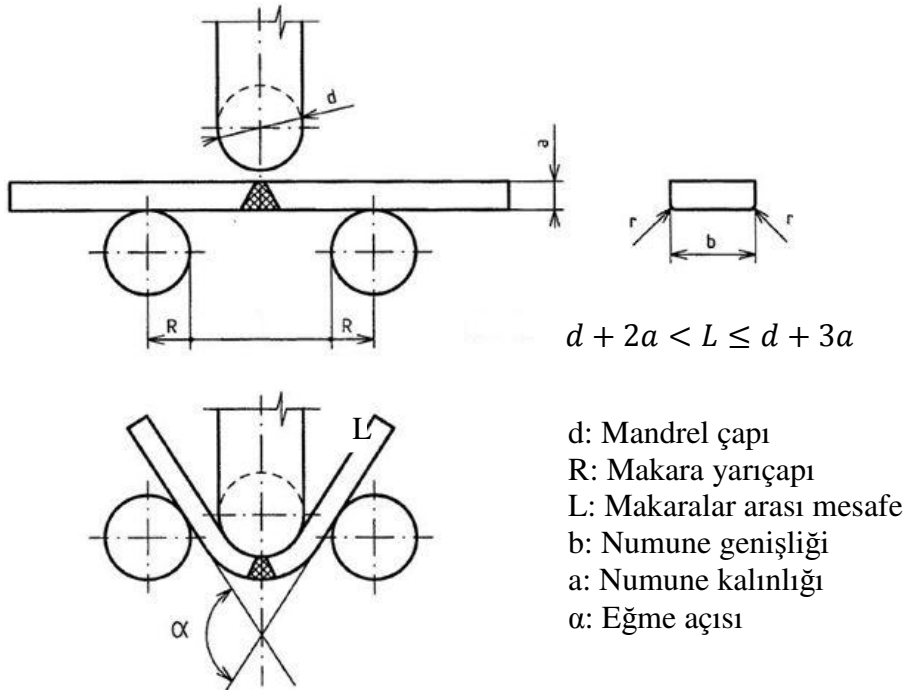
Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi laboratuvarında yapılan çalışmada Resim 3.5'te gösterilen Shimadzu marka Ag – 1 model 5 kN kapasiteli üç nokta eğme cihazı kullanılmıştır.

Üç nokta eğme deneyinde, numune iki silindir üzerinde yerleştirilmekte ve kaynak dikişini zorlayan mandrel bu silindirlerin tam ortasından dinamik bir kuvvet uygulamaktadır. Numune belirlenen eğme miktarına ulaştığında deney sona erer. Deney süresi her bir numune için aynıdır. Üç nokta eğme cihazı numunenin eğme dayanımını tespit etmektedir.



Resim 3.5. Shimadzu marka Ag – 1 model 5 kN kapasiteli üç nokta eğme cihazı

Üç nokta eğme deneyi için TS 282 EN 910 Metalik Malzemelerde Kaynak Dikişleri Üzerinde Tahribatlı Muayeneler – Eğme Deneyleri standardı kullanılmıştır. Standarda göre, üzerinde numune bulunan sabit iki makaranın yarıçapları ve bu makaraların ortasından kaynak dikişini eğmeye zorlayan mandrel çapı 10 mm'dir. Numuneler deney düzeneğine Şekil 3.4'te görüldüğü gibi kaynak dikişinin kök yüzeyi mandrele temas edecek şekilde yerleştirilmiştir.

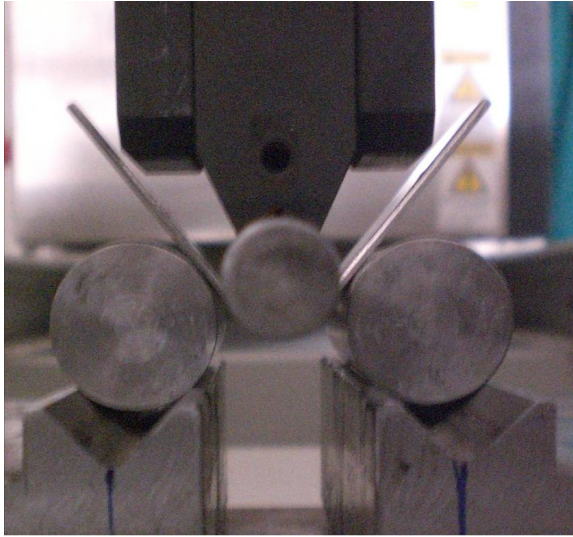


Şekil 3.4. Üç nokta eğme deneyi düzeneğinin şematik görünümü

Makaralar arası mesafe Eş. 3.4'le hesaplanır. Buna göre makaralar arası mesafe 16 mm olarak seçilmiştir.

$$d + 2a < L \leq d + 3a \Rightarrow 10 + 2 \times 2 < L \leq 10 + 6 \Rightarrow 14 < L \leq 16 \text{ mm} \quad (3.4)$$

TS 282'ye göre numune genişliği malzemenin kalınlığının 1,5 katı ve en az 20 mm olmalıdır. Buna göre numune genişliği 20 mm olarak tespit edilmiştir. Standarda göre deney 130° eğme açısına ulaşıldığında sona ermektedir. Deney hızı 1 mm/dk'dır. Resim 3.6, deney düzeneğinde mandrelin yük uyguladığı örnek numuneyi göstermektedir. Deneyler, oda sıcaklığında yapılmıştır.



Resim 3.6. Örnek numuneye uygulanan üç nokta eğme deneyi

Mandrel hareketinin kaynak dikişine uyguladığı kuvvet üç nokta eğme cihazının bağlı bulunduğu Trapezium bilgisayar programı tarafından algılanmakta ve program tarafından kaynak dikişinin eğme dayanımı hesaplanmaktadır.

4. DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR

4.1. Metalografik İncelemeler

Bu çalışmada, 5X, 10X ve 50X büyütme oranlarında her bir kaynak bölgesinin optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. Bu görüntülerin incelenmesiyle içyapı oluşumları hakkında çeşitli tespitler yapılmıştır.

4.1.1. Kaynak metali

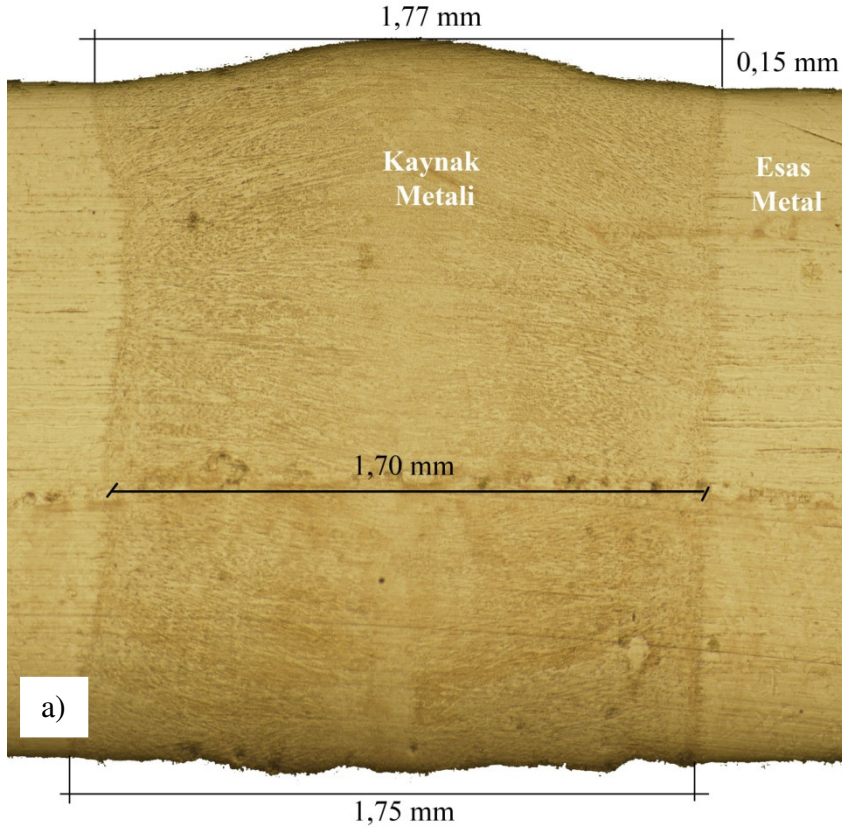
Kaynak metali, kaynak işlemi sırasında malzemenin tamamen eridiği ve sonra da katılaştığı bölgedir. Metallerin birleşme olayı katılaşmayla beraber bu bölgede gerçekleşir. Kaynak metali formu, genişliği ve içyapısı; ısı girdisi ve bazı kaynak parametrelerine bağlı olarak farklılıklar gösterir.

Bu çalışmada kaynak bölgelerinde malzeme kalınlığı (2 mm) boyunca tam nüfuziyet elde edilmiştir. Kaynak metali, üstten alta doğru daralan düzensiz konik bir yapıdadır. Katılaşan kaynak metali anahtar deliği formundadır. Lazer kaynak işleminde anahtar deliği profili genel bir karakteristiktir.

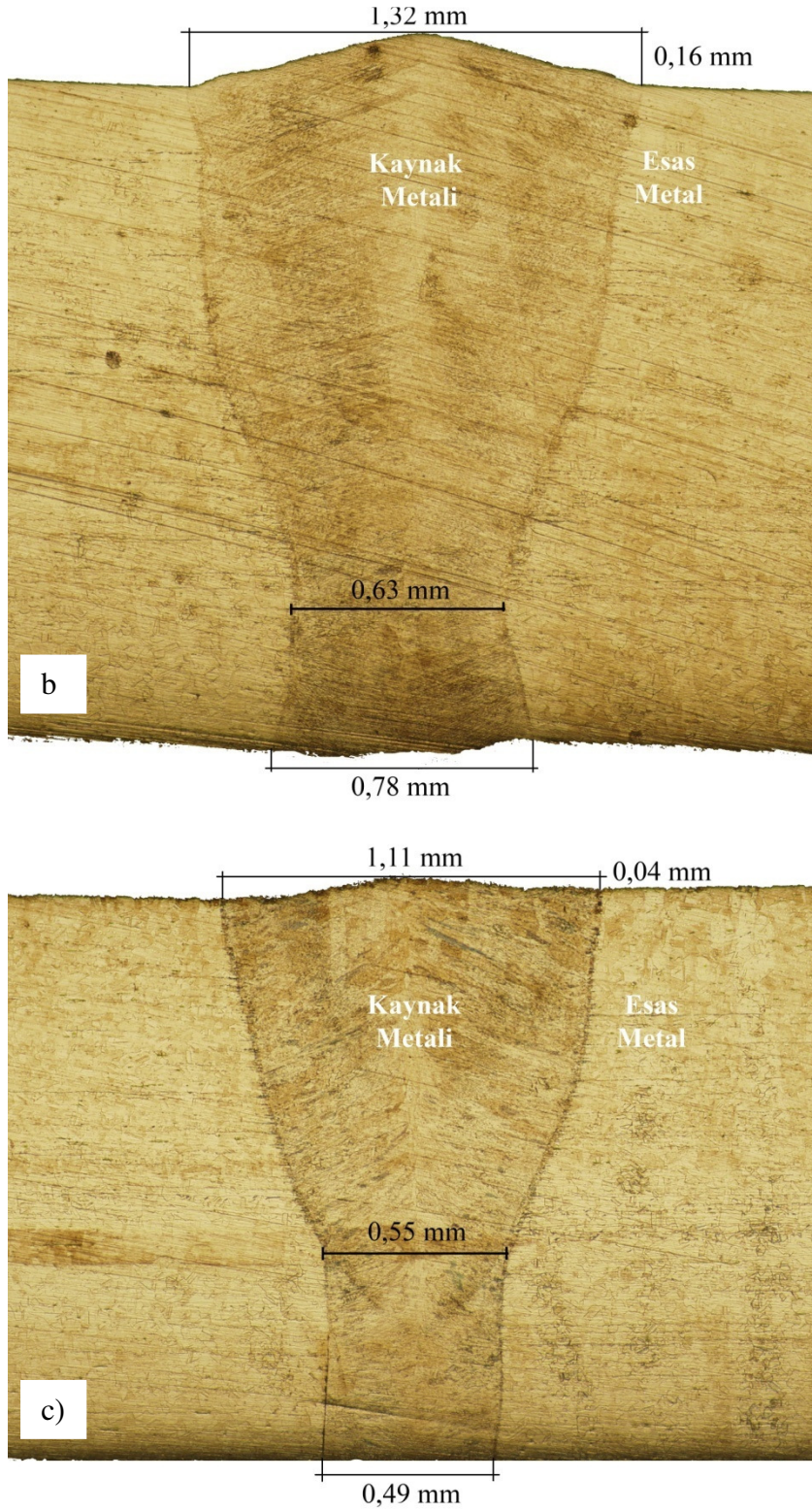
Hiçbir kaynak metalinde gözenek oluşumu gözlenmemiştir. Bu durum, koruyucu gazın yeterli koruma yaptığı ve kaynak metaline atmosferden gaz absorpsiyonu olmadığının kanıtıdır.

Kaynak hızının artmasıyla kaynak metali genişliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, ısı girdisindeki azalma nedeniyle eriyen kaynak metali miktarının azalmasından kaynaklanmaktadır. 1000 W lazer gücü ve 10 l/dk koruyucu gaz debisi uygulanan numunelerde Resim 4.1’de görüldüğü gibi 100 mm/dk kaynak hızı ile oluşan kaynak metali yüzey genişliği 1,77 mm ve kök genişliği 1,75 mm’dir. Bu boyut kesit kalınlığına paralel denecek bir kaynak metali katılaşması olduğunu göstermektedir. 200 mm/dk kaynak hızında kaynak metali yüzey genişliği 1,32 mm ve kök genişliği 0,78 mm’dir. 300 mm/dk kaynak hızı uygulanan numunenin kaynak

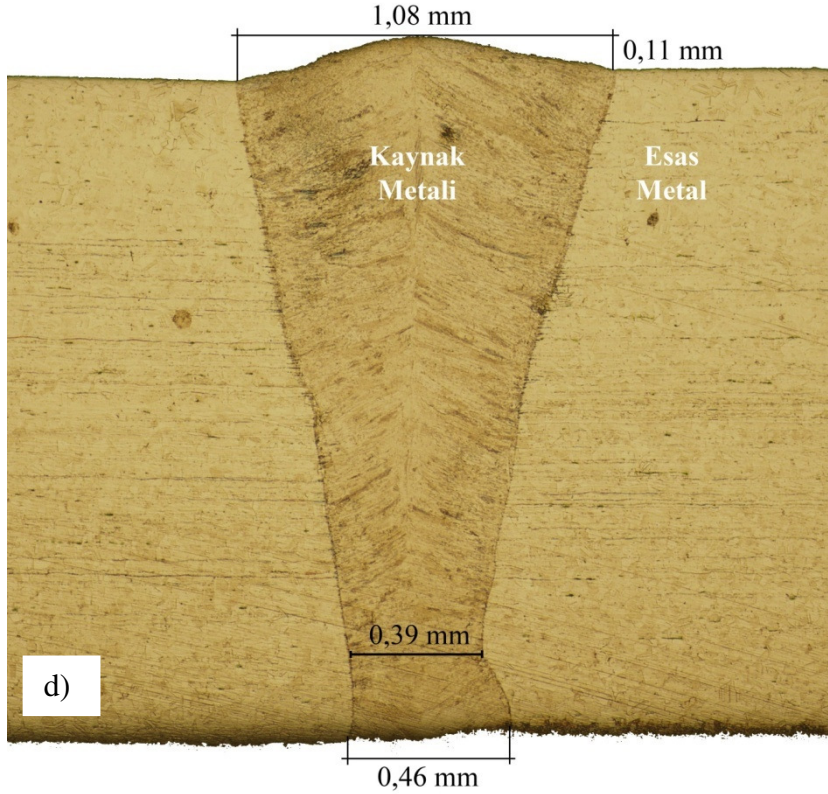
metali yüzey genişliği 1,11 mm ve kök genişliği 0,49 mm'dir. 400 mm/dk kaynak hızında ise kaynak metali yüzey genişliği 1,08 mm ve kök genişliği 0,46 mm'dir. Kaynak hızının artması ile ısı girdisi azalmakta, dikiş köküne etki eden ısı miktarının azalması sonucunda kökte daralan profilli bir dikiş katılaşması görülmektedir.



Resim 4.1. Kaynak hızının kaynak metali genişliğine etkisi; 1000 W lazer gücü, 10 l/dk koruyucu gaz debisi uygulanan numunelerde, a) Kaynak hızı 100 mm/dk



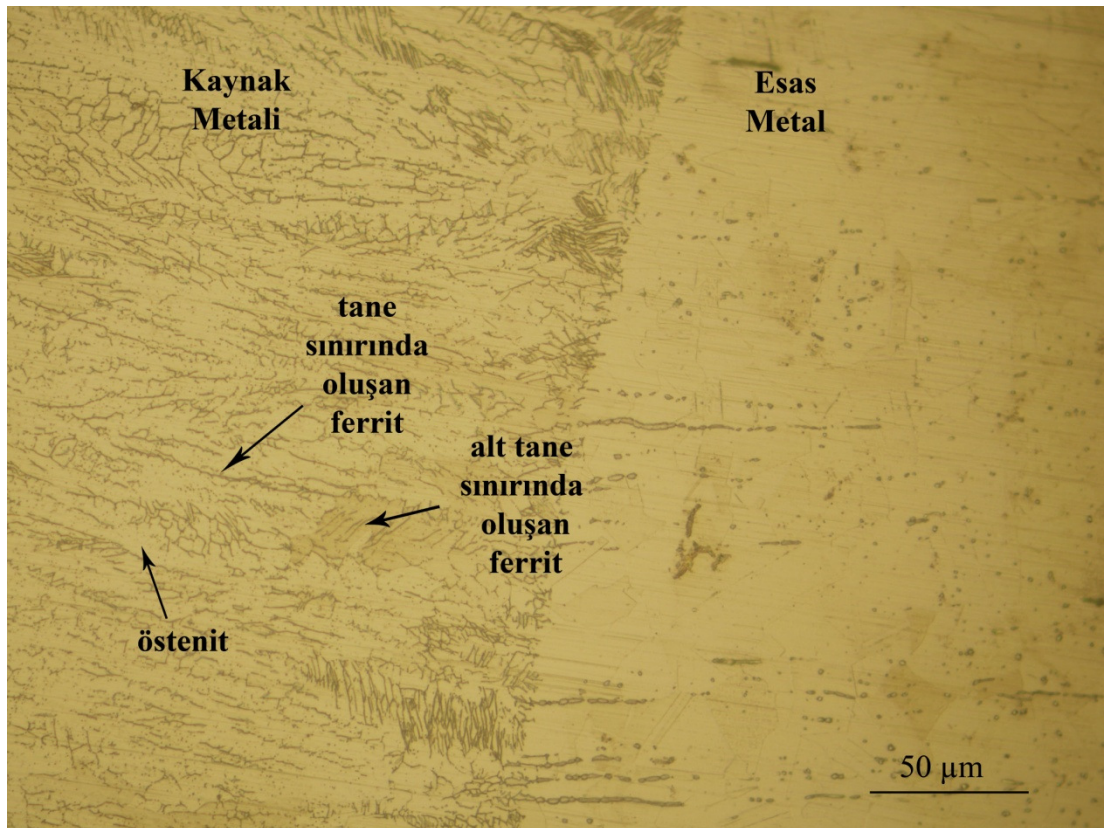
Resim 4.1. (Devam) Kaynak hızının kaynak metali genişliğine etkisi; 1000 W lazer gücü, 10 l/dk koruyucu gaz debisi uygulanan numunelerde, b) Kaynak hızı 200 mm/dk, c) Kaynak hızı 300 mm/dk



Resim 4.1. (Devam) Kaynak hızının kaynak metali genişliğine etkisi; 1000 W lazer gücü, 10 l/dk koruyucu gaz debisi uygulanan numunelerde, d) Kaynak hızı 400 mm/dk

Kaynak hızı arttıkça kaynağın yüzey ve kök genişlikleri arasındaki farkın arttığı tespit edilmiştir. Azalan kaynak hızıyla ısı girdisi birim alanda daha fazla yoğunlaşmakta ve azalan soğuma hızının da etkisiyle nüfuziyet boyunca daha derinlere ulaşarak kaynak metali kök genişliğini arttırmaktadır. Resim 4.1’de görüldüğü gibi kaynak hızının 100 mm/dk olduğu kaynak metalinde yüzey ve kök genişlikleri arasındaki fark 0,02 mm’dir. 200 mm/dk kaynak hızı uygulanan numuneye ait kaynak metalinde yüzey ve kök genişlikleri arasındaki fark 0,54 mm’dir. 300 mm/dk ve 400 mm/dk kaynak hızı uygulanan numunelere ait kaynak metalinde yüzey ve kök genişlikleri arasındaki fark 0,62 mm’dir. Yüksek kaynak hızlarındaki bu farkın daha az değiştiği görülmüştür. Bu durum, yüksek kaynak hızlarında ısı girdisinin malzeme yüzeyinde yoğunlaşmasından kaynaklanmaktadır.

Kaynak metalinde katılma epitaksiyel olarak başlamakta dendritik olarak tamamlanmaktadır. Sıvı metalin esas metalle temas ettiği ara yüzeyde ilk çekirdek oluşumuyla epitaksiyel katılma başlar. Katılmanın başlaması için aşırı soğuma gerekmediğinden kritik çekirdek çapı söz konusu değildir. Bu nedenle heterojen bir katılma oluşur. Östenit yapıya sahip dendritik kollar katılma süresince ilerlemekte, bu sırada alt tane ve tane sınırlarında yoğunlaşan ferrit yapıcı elementler ferrit oluşumunu sağlamaktadır. Dendritik katılmayla oluşumu tamamlanan östenit ile tane ve alt tane sınırlarında oluşan ferrit Şekil 4.2’de görülmektedir. Martenzit dönüşümü başlangıç sıcaklığı Eş. 2.1’den -5°C olarak hesaplanır. Buna göre oda sıcaklığına soğuyan kaynak metalinde martenzit oluşumu görülmez.



Resim 4.2. Kaynak metalinde oluşan ferrit ve östenit fazları (16 l/dk koruyucu gaz debisi, 3000 W lazer gücü, 400 mm/dk kaynak hızı)

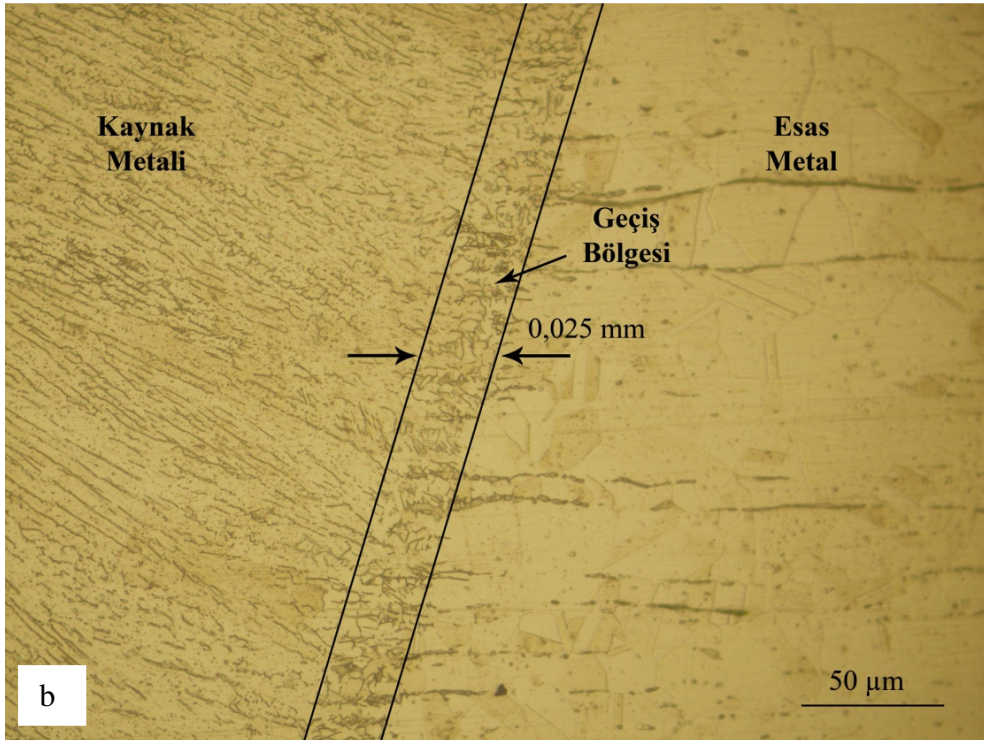
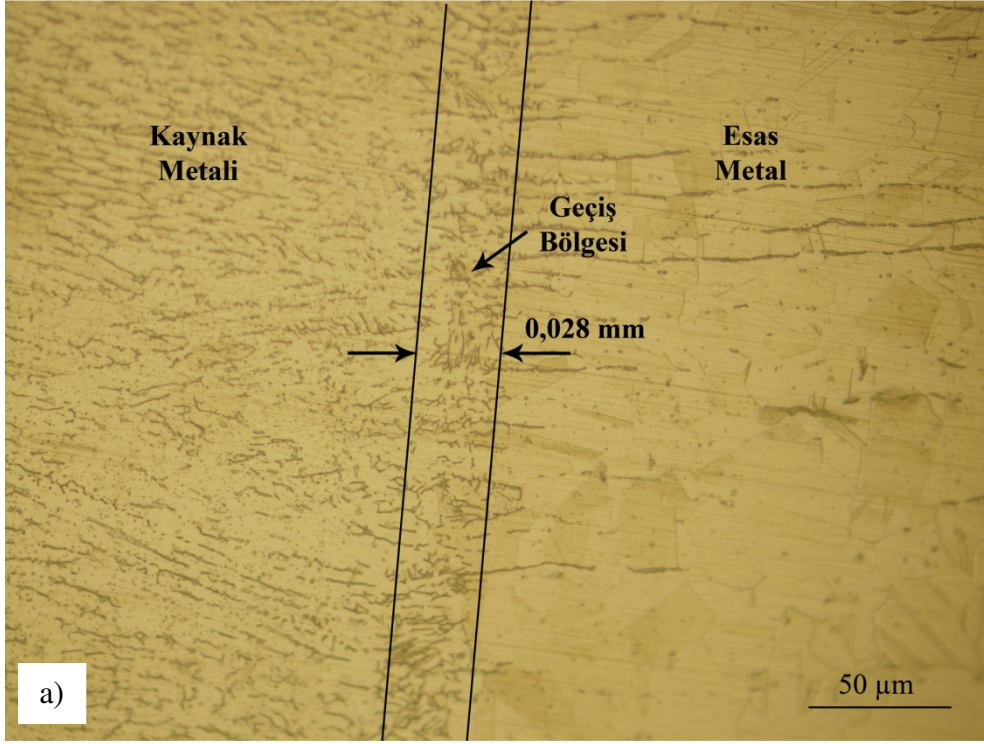
Kaynak hızı arttıkça kaynak metalinde katılma tanelerin büyüme doğrultuları ile kaynak merkez çizgisi arasındaki açı azalmaktadır. Kaynak hızı ile katılma arasında $R=V \cdot \cos\theta$ şeklinde bir ilişki vardır. Bu eşitlikte de görüldüğü gibi kaynak

hızı V arttıkça katılma doğrultuları ani yön değiştirerek kaynak merkez çizgisine doğru daralan bir şekilde katılırlar. Bu geometrik yapı ergime sınırına dik olarak büyüyen tanelerin kaynak hızı arttıkça yüzeye doğru yönelmesine sebep olur. Resim 4.1'de görüldüğü gibi yüksek kaynak hızlarında katılan taneler yüzeye doğru yönelmiştir.

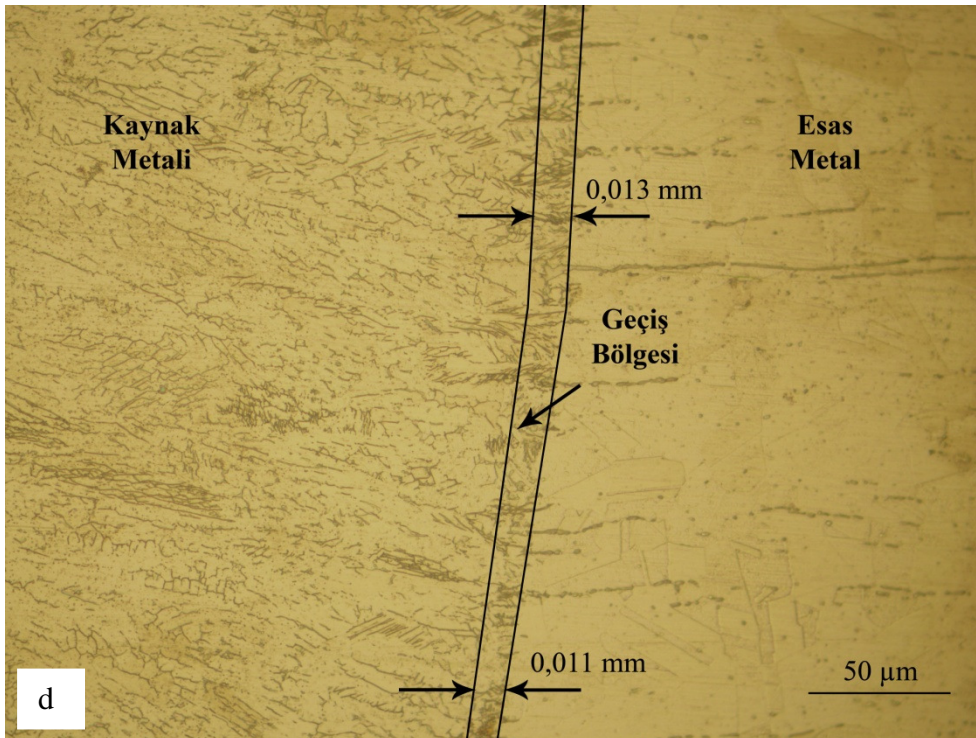
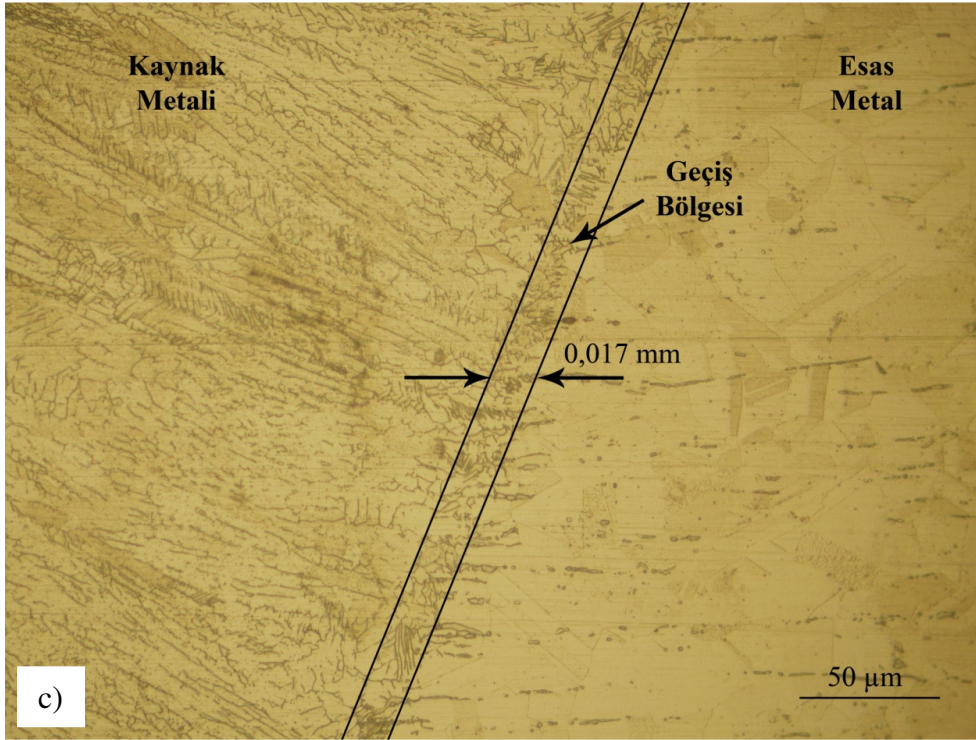
4.1.2. Geçiş bölgesi

Kaynak metali ile esas metal arasında kalan, kaynak işlemi sırasında ergimenin tam olarak tamamlanamadığı bölge, geçiş bölgesidir. Epitaksiyel katılma olayı, sıvı metal ile esas metalin temas ettiği ara yüzeyinin bulunduğu bu bölgede başlar.

Kaynak hızı arttıkça geçiş bölgesi genişliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, azalan ısı girdisinden kaynaklanmaktadır. 16 l/dk koruyucu gaz debisi ve 2000 W lazer gücü uygulanan numunelerde Resim 4.3'te görüldüğü gibi 100 mm/dk kaynak hızında geçiş bölgesi genişliği 0,028 mm'dir. 200 mm/dk kaynak hızı uygulanan numunede geçiş bölgesi genişliği 0,025 mm'dir. 300 mm/dk kaynak hızında geçiş bölgesi genişliği 0,017 mm'dir. 400 mm/dk kaynak hızında ise geçiş bölgesi genişliği 0,013 mm'dir. Geçiş bölgesi, dikiş yüzeyi ve kökünde de farklılık göstermektedir. Dikiş yüzeyinde ısı girdisinin etkisiyle geçiş bölgesi daha geniş olurken, dikiş kökünde geçiş bölgesinin daha dar olduğu tespit edilmiştir. Resim 4.3 d'de dikiş yüzeyinde geçiş bölgesi genişliği 0,013 mm ve dikiş kökünde geçiş bölgesi genişliği 0,011 mm'dir.



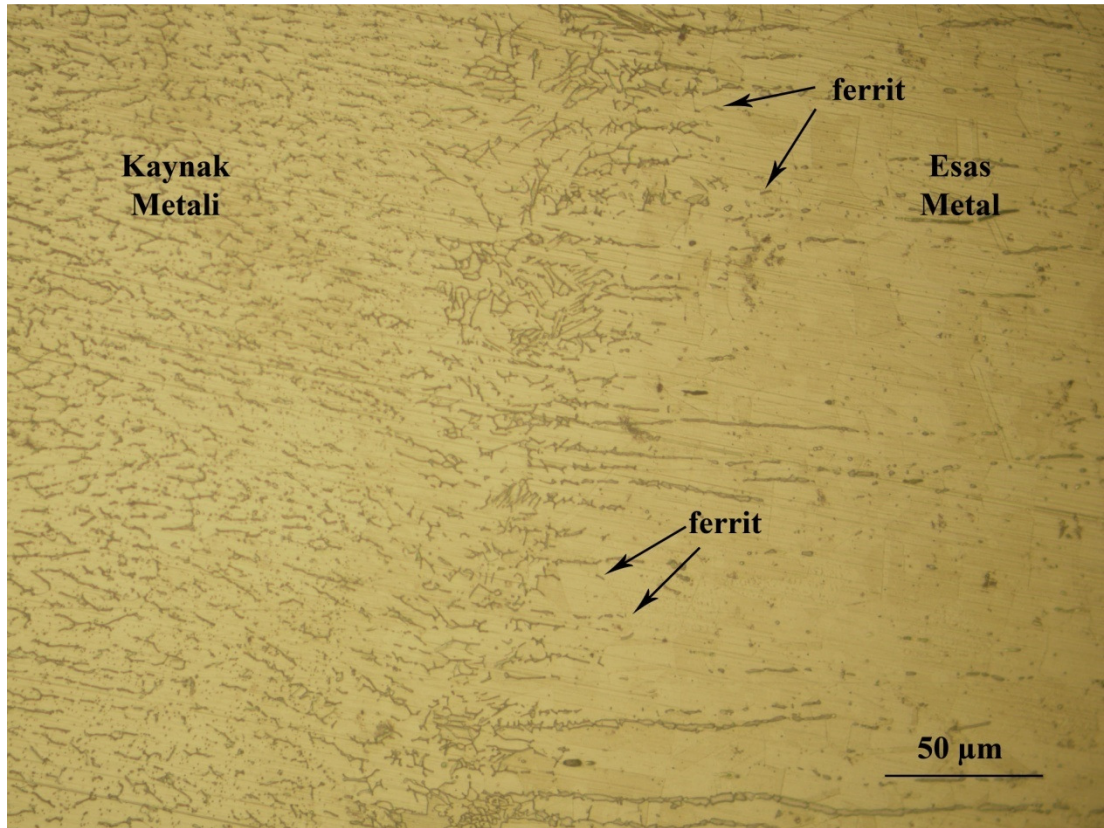
Resim 4.3. Kaynak hızının geçiş bölgesi genişliğine etkisi; 2000 W lazer gücü, 16 l/dk koruyucu gaz debisi uygulanan numuneler, a) Kaynak hızı 100 mm/dk, b) Kaynak hızı 200 mm/dk



Resim 4.3. (Devam) Kaynak hızının geçiş bölgesi genişliğine etkisi; 2000 W lazer gücü, 16 l/dk koruyucu gaz debisi uygulanan numuneler, c) Kaynak hızı 300 mm/dk, d) Kaynak hızı 400 mm/dk

4.1.3. ITAB

Kaynak işleminde ısı tesiri altında kalan ve ergimenin olmadığı esas metale ait bölgedir. Allotropik özellik göstermeyen östenitik paslanmaz çeliklerde kaynak sonrasında ITAB belirgin değildir. ITAB'ta östenit tane sınırlarında ferrit oluşumu tespit edilmiştir. Resim 4.4'te görüldüğü gibi oluşan ferrit plakaları ITAB'ta tane büyümesini engeller.

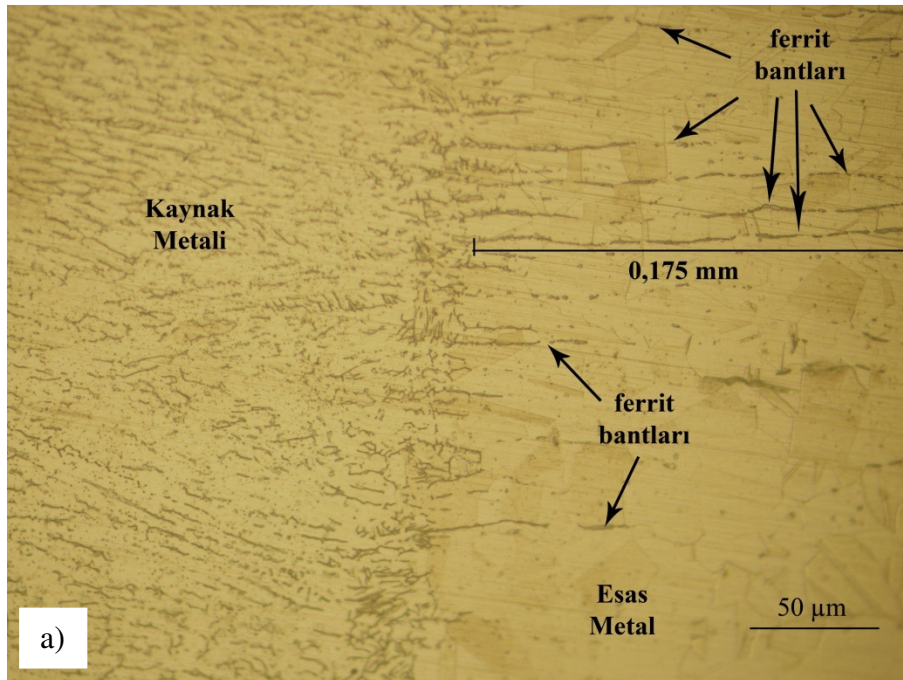


Resim 4.4. ITAB'ta östenit tane sınırlarında oluşan ferritler (1000 W lazer gücü, 12 l/dk koruyucu gaz debisi, 100 mm/dk kaynak hızında)

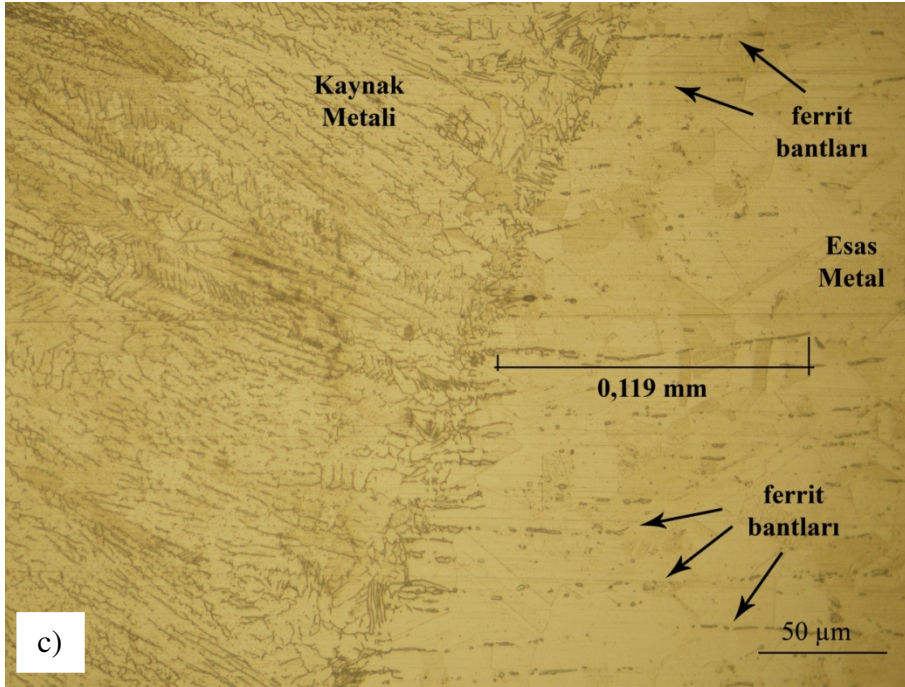
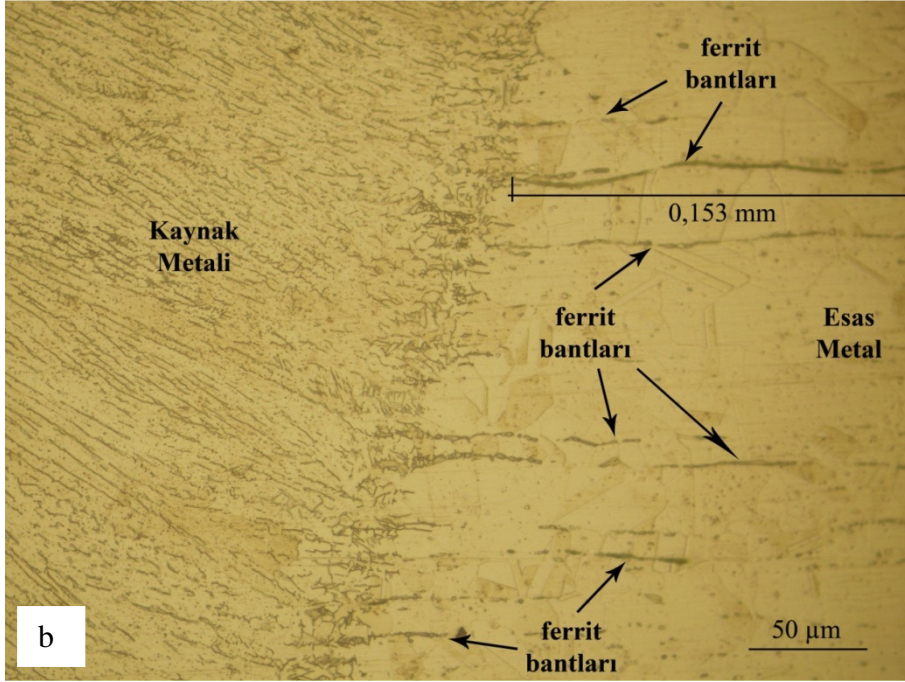
ITAB'ta kaynak metalinden esas metale doğru yatay doğrultuda uzanan ferrit bantları tespit edilmiştir. Bu oluşumlar, katılaşmayla beraber kaynak metalinden uzaklaşan ısınn ITAB'ta ve esas metalde oluşturduğu ısı dağılım hatlarıdır. Kaynak hızı arttıkça bu bölgede oluşan ferrit bantlarının uzunlukları azalır, daha az yoğunlukta süresiz şekilde oluşurlar. 2000 W lazer gücü, 16 l/dk koruyucu gaz debisi uygulanan numunelerde, Resim 4.5'te görüldüğü gibi 100 mm/dk kaynak

hızında ITAB'ta oluşan ferrit bantlarından birinin uzunluğu 0,175 mm'dir. 200 mm/dk kaynak hızı uygulanan numunede örnek bir ferrit bandının uzunluğu 0,153 mm'dir. 300 mm/dk kaynak hızında daha az yoğunlukta ferrit bandı oluşmuştur ve örnek ferrit bandı uzunluğu 0,119 mm'dir. 400 mm/dk kaynak hızı uygulanan numunede ise örnek ferrit bandının uzunluğu 0,062 mm'dir.

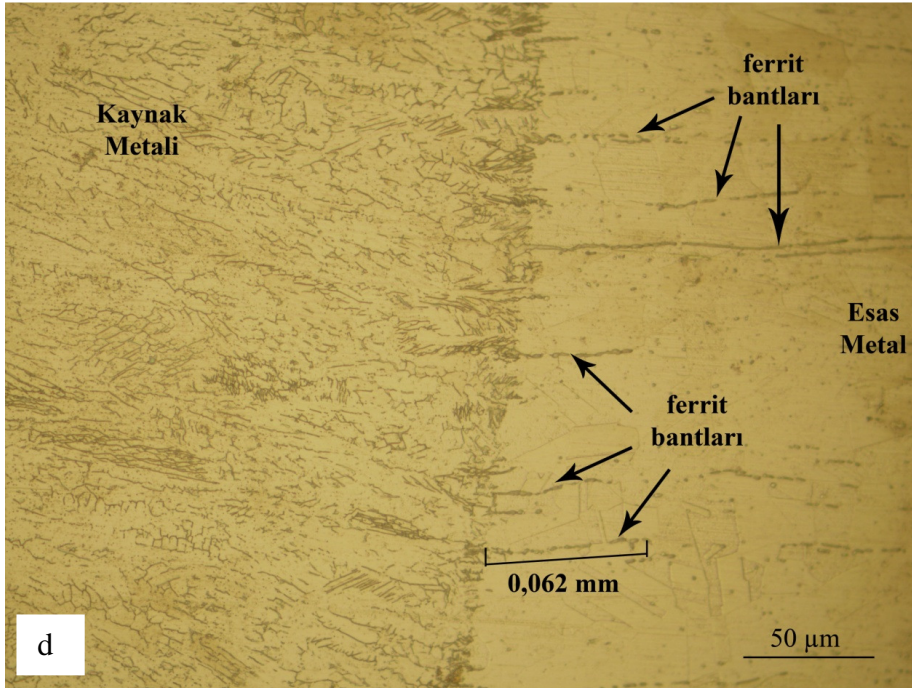
Lazer gücü arttıkça bu bölgede östenit tane sınırları boyunca uzanan ferrit bantlarının daha fazla yoğunlukta ve yüksek lazer güçlerinde sürekli şekilde oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum, artan ısıнын kaynak bölgesinden uzaklaşırken ITAB'ın daha uzun süre ısıl etkide kalmasından dolayı meydana gelir. 300 mm/dk kaynak hızı ve 12 l/dk koruyucu gaz debisi uygulanan numunelerde, Resim 4.6'da görüldüğü gibi 1000 W lazer gücünde oluşan ferrit bandının uzunluğu 0,038 mm'dir. 2000 W lazer gücü uygulanan numunede ferrit bandının uzunluğu 0,042 mm'dir. 3000 W lazer gücünde ferrit bandının oluşumu sürekli ve uzunluğu 0,153 mm'dir. 4000 W lazer gücü uygulanan numunede oluşan örnek bir ferrit bandının uzunluğu 0,172 mm'dir.



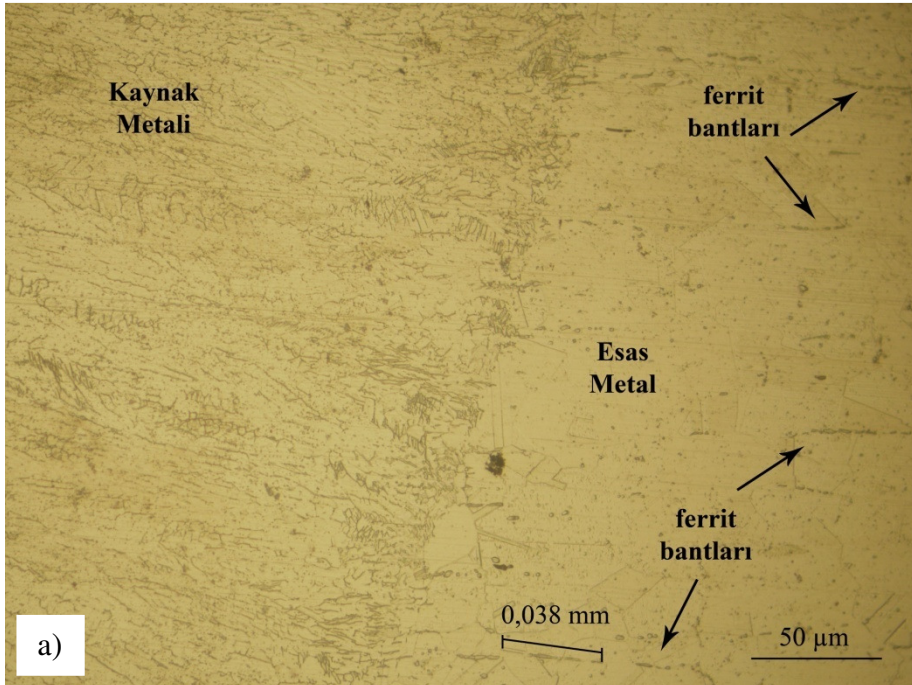
Resim 4.5. ITAB'ta ferrit bantları oluşumu; 2000 W lazer gücü, 16 l/dk koruyucu gaz debisi uygulanan numuneler, a) Kaynak hızı 100 mm/dk



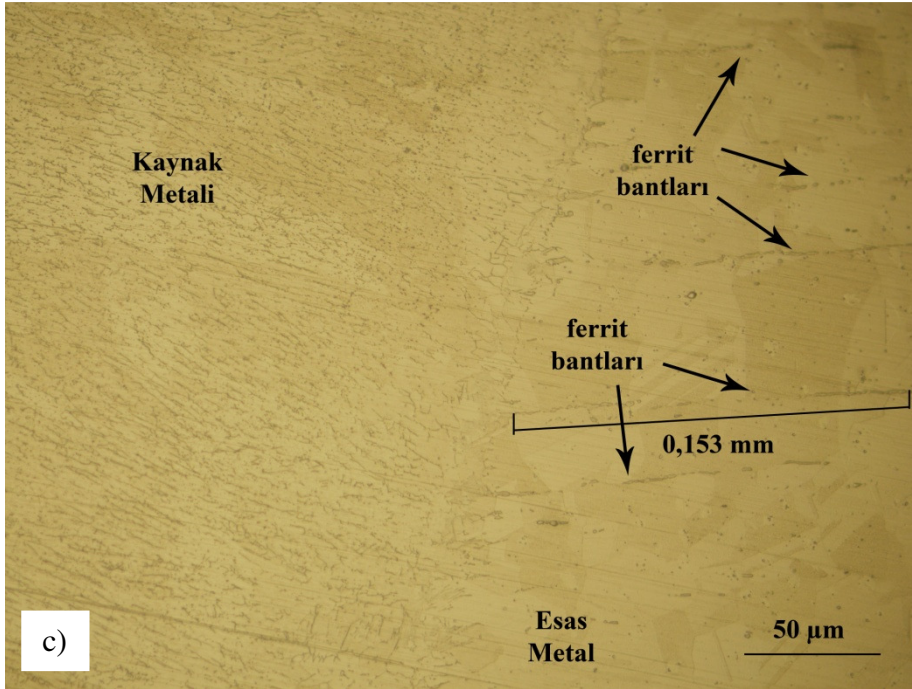
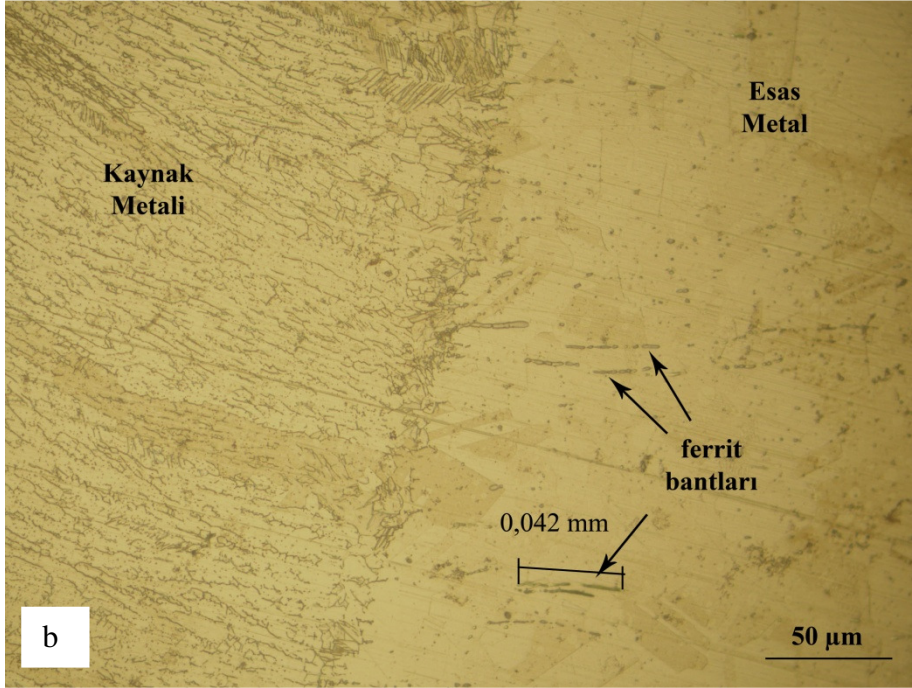
Resim 4.5. (Devam) ITAB'ta ferrit bantları oluşumu; 2000 W lazer gücü, 16 l/dk koruyucu gaz debisi uygulanan numuneler, b) Kaynak hızı 200 mm/dk, c) Kaynak hızı 300 mm/dk



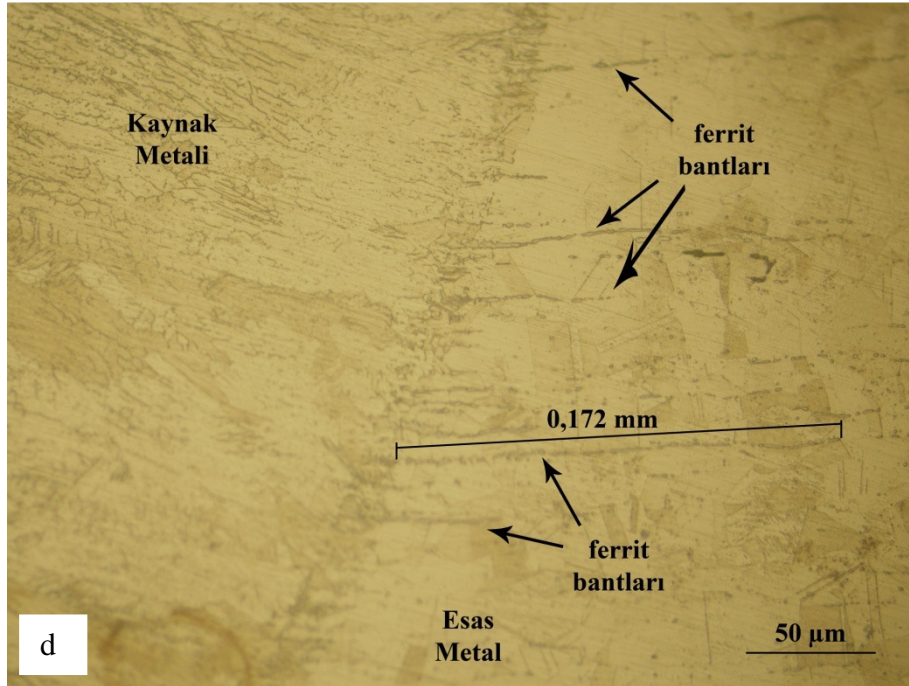
Resim 4.5. (Devam) ITAB'ta ferrit bantları oluşumu; 2000 W lazer gücü, 16 l/dk koruyucu gaz debisi uygulanan numuneler, d) Kaynak hızı 400 mm/dk



Resim 4.6. ITAB'ta ferrit bantları oluşumu; 300 mm/dk kaynak hızı, 12 l/dk koruyucu gaz debisi uygulanan numuneler, a) Lazer gücü 1000 W



Resim 4.6. (Devam) ITAB'ta ferrit bantları oluşumu; 300 mm/dk kaynak hızı, 12 l/dk koruyucu gaz debisi uygulanan numuneler, b) Lazer gücü 2000 W, c) Lazer gücü 3000 W



Resim 4.6. (Devam) ITAB'ta ferrit bantları oluşumu; 300 mm/dk kaynak hızı, 12 l/dk koruyucu gaz debisi uygulanan numuneler, d) Lazer gücü 4000 W

4.2. Mikro Sertlik Deneyi Sonuçları

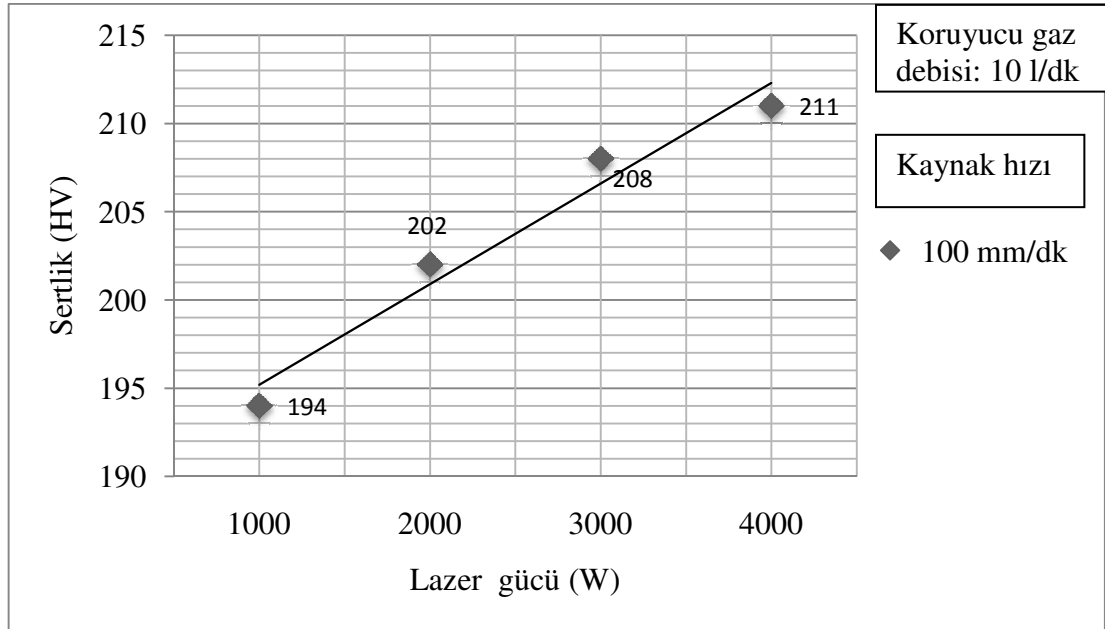
Bu çalışmada, sertlik ölçümleri Vickers mikro sertlik yöntemiyle, kaynak metali, geçiş bölgesi ve esas metal olmak üzere üç farklı bölgede yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, kaynak metalinin sertliği, geçiş bölgesi ve esas metalin sertliklerinden yüksektir. Bunun nedeni, kaynak metalinin yüksek ısı girdisiyle aniden eriyerek hızlı bir şekilde katılaşmasıdır. Geçiş bölgesinin sertliği esas metalin sertliğinden yüksektir. Bu durum, geçiş bölgesindeki ferrit oluşumlarından kaynaklanmaktadır. Isının kaynak metalinden esas metale doğru yayıldığına kanıttır. Örneğin, 10 l/dk koruyucu gaz debisi, 1000 W lazer gücü ve 200 mm/dk kaynak hızı uygulanan numuneye ait kaynak metali sertliği 207 HV, geçiş bölgesi sertliği 197 HV olarak tespit edilmiştir.

Bu çalışmada ayrıca, lazer gücü ve kaynak hızının kaynak metali sertliğine olan etkileri incelenmiştir.

4.2.1. Lazer gücünün kaynak metali sertliğine etkisi

Kaynak işleminde numuneye uygulanan lazer gücü arttıkça kaynak metali sertliğinin genel anlamda arttığı tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek ısı girdisi sırasında paslanmaz çeliğin zaten düşük olan ısı iletkenliği sonucunda soğuma hızı daha yavaş olacağından paslanmaz çeliklerde görülen delta ferrit ve sigma fazı gibi sertlik artırıcı fazların oluşma ihtimalinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Örneğin, 10 l/dk koruyucu gaz debisi ve 100 mm/dk kaynak hızı uygulanan numunelerde 1000 W lazer gücünde kaynak metali sertliği 194 HV, 2000 W lazer gücünde 202 HV, 3000 W lazer gücünde 208 HV ve 4000 W lazer gücünde 211 HV olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi düşük lazer gücü uygulanan numunelerin kaynak metali sertliği daha düşüktür. Kaynak metaline ait en yüksek sertlik 4000 W lazer gücünde elde edilmiştir.

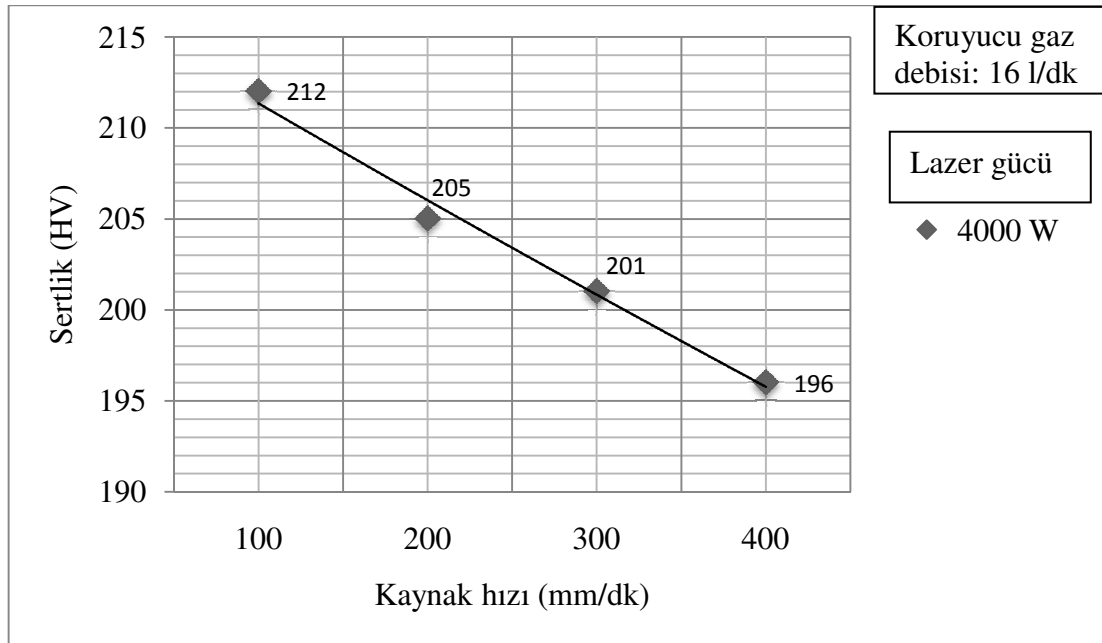


Şekil 4.1. Lazer gücü – kaynak metali sertliği ilişkisi (10 l/dk koruyucu gaz debisi ve 100 mm/dk kaynak hızı uygulanan numunelerde)

4.2.2. Kaynak hızının kaynak metali sertliğine etkisi

Kaynak işlemi sırasında uygulanan kaynak hızı arttıkça kaynak metali sertliklerinin genel anlamda azaldığı tespit edilmiştir. Kaynak hızındaki artış, kaynak sırasında malzemeye aktarılan ısı miktarını azalmaktadır. Azalan ısı girdisiyle soğuma hızı artacağından katılaşan kaynak metalinde delta ferrit ve sigma fazı oluşuma ihtimali azalmaktadır. Buna bağlı olarak kaynak metali sertliğinde azalma olduğu düşünülmektedir.

Örneğin, 16 l/dk koruyucu gaz debisi ve 4000 W lazer gücü uygulanan numunelerde 100 mm/dk kaynak hızında kaynak metali sertliği 212 HV, 200 mm/dk kaynak hızında 205 HV, 300 mm/dk kaynak hızında 201 HV ve 400 mm/dk kaynak hızında 196 HV olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi düşük kaynak hızı uygulanan numunelerin kaynak metali sertliği daha yüksektir. Kaynak metaline ait en yüksek sertlik 100 mm/dk kaynak hızında elde edilmiştir.



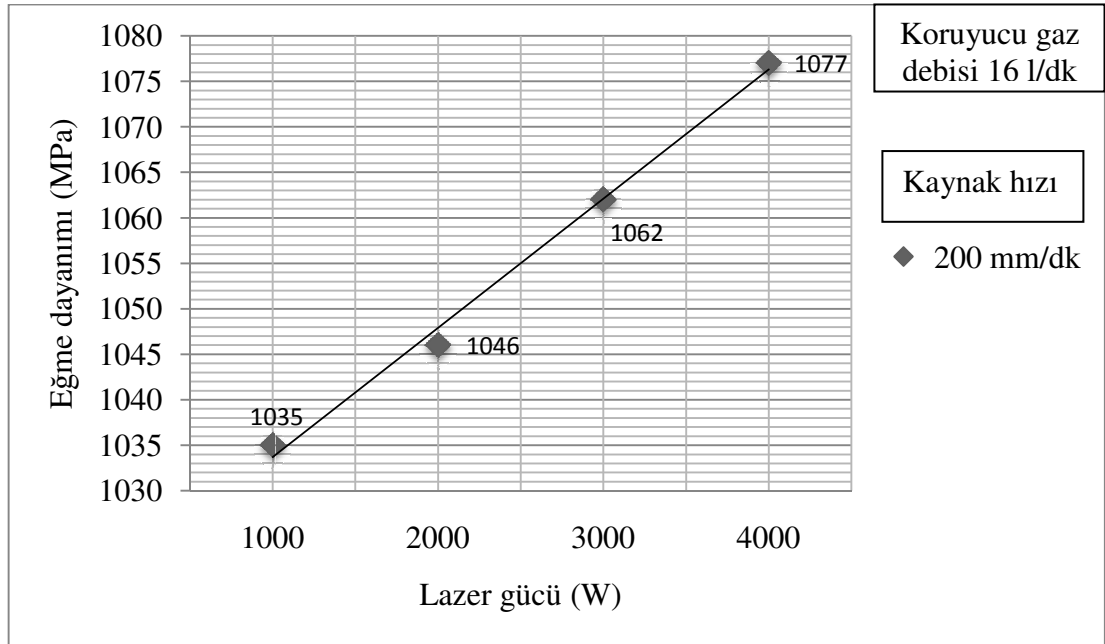
Şekil 4.2. Kaynak hızı – kaynak metali sertliği ilişkisi (16 l/dk koruyucu gaz debisi ve 4000 W lazer gücü uygulanan numunelerde)

4.3. Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

Bu çalışmada, TS 282 EN 910 standardına uygun olarak kaynak bölgesine üç nokta eğme deneyi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, kaynak parametrelerinin eğme dayanımına olan etkileri belirlenmiştir.

4.3.1. Lazer gücünün eğme dayanımına etkisi

Kaynak işlemi sırasında uygulanan lazer gücü arttıkça eğme dayanımının genel anlamda arttığı tespit edilmiştir. Bu durum, lazer gücündeki artışla beraber ısı girdisinin artmasından kaynaklanmaktadır. Isı girdisindeki artışla beraber ferrit fazı artmaktadır. Ayrıca, bu durum kaynak bölgesinde sıcak çatlak riskini azaltır.



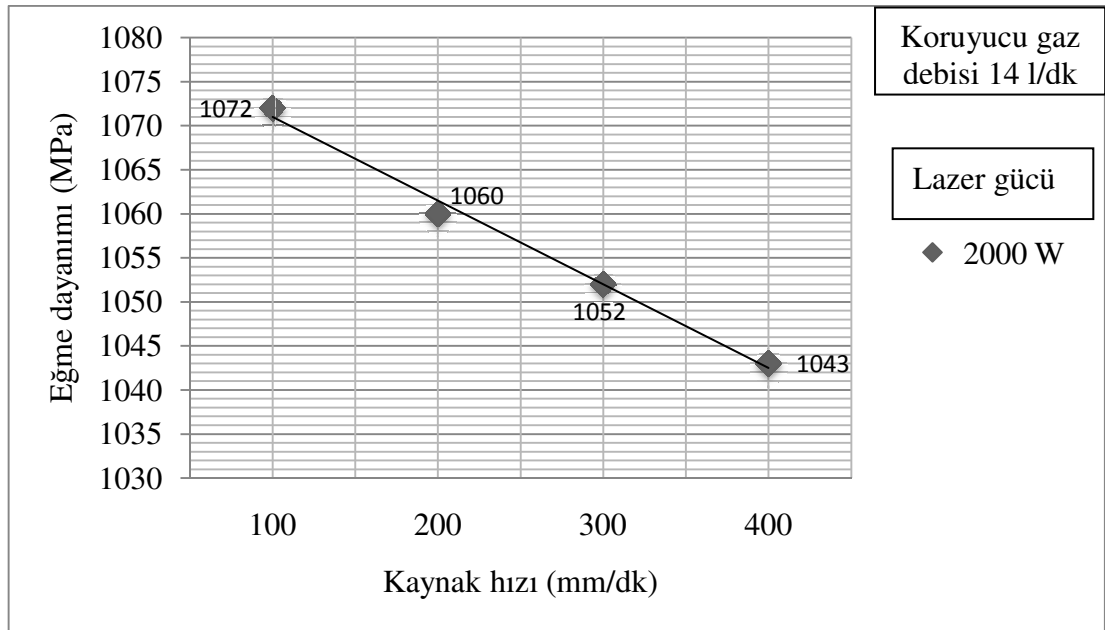
Şekil 4.3. Lazer gücü – eğme dayanımı ilişkisi (16 l/dk koruyucu gaz debisi ve 200 mm/dk kaynak hızı uygulanan numunelerde)

Örneğin, 16 l/dk koruyucu gaz debisi ve 200 mm/dk kaynak hızı uygulanan numunelerde 1000 W lazer gücünde eğme dayanımı 1035 MPa, 2000 W lazer gücünde 1046 MPa, 3000 W lazer gücünde 1062 MPa ve 4000 W lazer gücünde 1077 MPa olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi düşük lazer gücü

uygulanan numunelerin eğme dayanımı daha düşüktür. En yüksek eğme dayanımı 4000 W lazer gücünde elde edilmiştir.

4.3.2. Kaynak hızının eğme dayanımına etkisi

Kaynak işlemi sırasında numunelere uygulanan kaynak hızı arttıkça eğme dayanımının genel anlamda azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, artan kaynak hızıyla ısı girdisinin azalması sonucunda soğuma hızının artması ve buna bağlı olarak ferrit miktarının azalmasından kaynaklanabilir. Azalan ferrit miktarı aynı zamanda kaynak bölgesinde sıcak çatlak riskini arttırarak eğme dayanımını olumsuz etkiler. Ayrıca, artan kaynak hızı hem yetersiz korumaya hem de kaynak hatalarına yol açtığından eğme dayanımının düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.4. Kaynak hızı – eğme dayanımı ilişkisi (14 l/dk koruyucu gaz debisi ve 200 W lazer gücü uygulanan numunelerde)

Örneğin, 14 l/dk koruyucu gaz debisi ve 2000 W lazer gücü uygulanan numunelerde 100 mm/dk kaynak hızında eğme dayanımı 1072 MPa, 200 mm/dk kaynak hızında 1060 MPa, 300 mm/dk kaynak hızında 1052 MPa ve 400 mm/dk kaynak hızında 1043 MPa olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi düşük kaynak hızı

uygulanan numunelerin eğme dayanımı daha yüksektir. En yüksek eğme dayanımı 100 mm/dk kaynak hızında elde edilmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, CO₂ lazer kaynak yöntemiyle birleştirilmiş AISI 304 paslanmaz çelik malzemelerde kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkileri üç nokta eğme testleri ile incelenmiştir. Öncelikle paslanmaz çelik numuneler CO₂ lazer kaynak yöntemiyle birleştirilmiş, oluşan kaynak bölgesinin metalografik incelemesi yapılmıştır. Daha sonra kaynak bölgesinin mikro sertliği ölçülmüş ve üç nokta eğme dayanımı belirlenmiştir.

5.1. Tartışma

Elde edilen kaynak bölgelerinde malzeme kalınlığı (2mm) boyunca tam nüfuziyet tespit edilmiştir. Kaynak metali azalan ergime gücünün etkisiyle üstten alta doğru daralan, düzensiz, konik bir yapıdadır. Katılan kaynak metali anahtar deliği formundadır. Kaynak metalinin bu profili kaynak parametreleriyle değişiklik göstermektedir. Costa vd. [15], lazer kaynak yöntemi kullanarak yaptığı çalışmada benzer olarak kaynak metalinin konik bir yapıda olduğunu belirtmiştir.

Hiçbir kaynak metalinde gözenek oluşumu görülmemiştir. Bu durum, koruyucu gazın yeterli koruma yaptığı ve kaynak metalinde atmosferden gaz absorpsiyonu olmadığını kanıtlar.

Kaynak metali genişliği kaynak hızının artmasıyla azalmaktadır. Bu durum, ısı girdisindeki azalma nedeniyle ergiyen kaynak metali miktarının azalmasından kaynaklanmaktadır. Akman E., yapmış olduğu çalışmada kaynak bölgesinde enerji artışıyla meydana gelen bir genişleme tespit etmiştir [62]. Durmuş [63], Gao vd. [64], Quintino vd. [65], Tokdemir [25], Çelen [66], yaptıkları çalışmalarda elde edilen sonuca benzer olarak kaynak bölgesi genişliğinin kaynak hızının artmasıyla azaldığını tespit etmişlerdir.

Kaynak hızı arttıkça kaynak metalinin yüzey ve kök genişlikleri arasındaki fark artmaktadır. Kaynak hızının azalmasıyla ısı girdisi birim alanda daha fazla

yoğunlaşmaktadır. Azalan soğuma hızının da etkisiyle malzemeye aktarılan ısı, nüfuziyet boyunca daha derinlere ulaşarak kaynak metali kök genişliğini arttırmaktadır. Yüksek kaynak hızlarında ısı girdisinin malzeme yüzeyinde yoğunlaşmasından dolayı genişlikler arasındaki bu fark daha az değişmektedir. Quan vd. [14], Caiazzo vd. [22], yaptıkları çalışmalarda kaynak metali genişliğinin ısı girdisindeki artışla beraber arttığını ve aralarındaki farkın yüksek kaynak hızlarında arttığını belirtmiştir.

Kaynak metalinde katılma epitaksiyel olarak başlamakta, dendritik olarak tamamlanmaktadır. İlk çekirdeklenme, sıvı metal ile esas metal arasında oluşur ve epitaksiyel katılma başlar. Aşırı soğuma gerçekleşmediğinden dolayı kritik çekirdek çapı söz konusu değildir. Bu nedenle, kaynak metalinde başlayan epitaksiyel katılma olayı heterojen bir yapıdadır [67]. Katılma süresince östenit yapıya sahip dendritik kollar ilerlemekte, bu sırada ferrit yapıcı elementlerin etkisiyle ferrit alt tane ve tane sınırlarında oluşmaktadır [68]. Eş. 2.1’de verilen martenzit dönüşümü başlangıç sıcaklığı deney malzemesi için $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla oda sıcaklığına soğuyan deney numunelerinin kaynak metalinde martenzit oluşumu görülmemektedir.

Kaynak hızı arttıkça kaynak metalinde oluşan tanelerin büyüme doğrultuları ile kaynak merkez çizgisi arasındaki açı azalmaktadır. Yani, kaynak hızı arttıkça östenit tane sınırlarında oluşan ferritlerin yönelimi yüzeye doğru gerçekleşir. Kaynak hızı ile katılma arasındaki ilişki $R=V.\cos\theta$ ’dır. Buna göre, kaynak hızı arttıkça katılma doğrultularının aniden yön değiştirmesi sonucunda taneler kaynak merkez çizgisine doğru daralan bir şekilde katılır. Bu geometrik yapı ergime sınırına dik olarak büyüyen tanelerin kaynak hızı arttıkça yüzeye doğru yönelmesine sebep olur.

Katılan kaynak bölgesinde kaynak metali ile esas metal arasında ergimenin tam olarak tamamlanamadığı geçiş bölgesi tespit edilmiştir. Geleneksel kaynak yöntemlerine göre lazer kaynak yönteminde ısı girdisinin düşük olması nedeniyle geçiş bölgesi genişliği daha dardır. Durmuş [63], Tokdemir [25], Çelen [66], Çalık [69], Metzger ve Lison [70] yaptıkları çalışmalarda benzer tespitte bulunmuştur.

Geçiş bölgesinin dar olması düşük ısı girdisinin sağladığı hızlı soğuma nedeniyle gerçekleşir [25, 67]. Kaynak hızının düşük olduğu işlemlerde geçiş bölgesinin daha geniş olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, artan ısı girdisinden kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde Quan [14], Akman [62], ısı girdisindeki artışın geçiş bölgesi genişliğini arttırdığını tespit etmiştir. Geçiş bölgesi, dikiş yüzeyi ve dikiş kökünde de farklılık göstermektedir. Dikiş yüzeyinde ısı girdisinin etkisiyle geçiş bölgesi daha geniş olurken, dikiş kökünde geçiş bölgesinin daha dar olduğu tespit edilmiştir.

Kaynak işleminde ısı tesiri altında kalan ve ergimenin olmadığı esas metale ait bölge ITAB olarak adlandırılır. Allotropik özellik göstermeyen östenitik paslanmaz çelikler gibi malzemelerde kaynak sonrasında ITAB belirgin değildir. ITAB'ta östenit tane sınırlarında ferrit oluşumu tespit edilmiştir.

ITAB'ta kaynak metalinden esas metale doğru yatay doğrultuda uzanan ferrit bantları tespit edilmiştir. Bu oluşumlar, katılaşmayla beraber kaynak metalinden uzaklaşan ısının ITAB ve esas metalde oluşturduğu ısı dağılım hatlarıdır. Kaynak hızı arttıkça bu bölgede oluşan ferrit bantları uzunluklarının azaldığı ve süresiz şekilde oluştukları görülmüştür. Lazer gücü arttıkça bu bölgede östenit tane sınırları boyunca uzanan ferrit bantlarının daha fazla yoğunlukta ve yüksek lazer güçlerinde sürekli şekilde oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum, artan ısı girdisine bağlı soğuma hızının azalması sonucu östenit tane sınırında ferrit ağlarının oluşmasına neden olmuştur. Costa vd. [15], Abuç [48], yaptıkları çalışmalarda ısının kaynak metalini terk etmesi sırasında ITAB ve esas metalde oluşan ferrit bantlarını tespit etmişlerdir.

Deneyisel çalışmada her bir numunenin kaynak bölgesine uygulanan mikro sertlik ölçümleri sonucunda kaynak metalinin en yüksek sertlik değerine sahip olan bölge olduğu tespit edilmiştir. Kaynak metalinin sertliği geçiş bölgesi ve esas metalin sertliğinden yüksektir. Bunun nedeni, kaynak metalinin yüksek ısı girdisiyle aniden eriyerek hızlı bir şekilde katılaşmasıdır [25]. Ayrıca geçiş bölgesinin sertliği esas metalin sertliğinden yüksektir. Bu durum, geçiş bölgesindeki ferrit oluşumlarından kaynaklanmaktadır. Isının kaynak metalinden esas metale doğru yayıldığının kanıtıdır. Costa vd. [14], Mei vd. [20], Caiazzo vd. [22], Tokdemir [25], Schubert vd.

[71], Yavuz ve am [38], Li ve Fontana [72], Li vd. [73], yaptıkları çalışmalarda en yüksek setliği kaynak metalinde tespit etmişlerdir.

Kaynak işleminde numuneye uygulanan lazer gücü arttıkça kaynak metali sertliğinin genel anlamda arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, kaynak hızının artmasıyla kaynak metal sertliğinin genel anlamda azaldığı belirlenmiştir. Lazer gücü ve kaynak hızının ısı girdisine olan etkileri göz önüne alındığında ısı girdisi arttıkça kaynak metali sertliğinin genel anlamda arttığı görülmektedir. Yüksek ısı girdisi sırasında paslanmaz çeliğin zaten düşük olan ısıl iletkenliği sonucunda soğuma hızı daha yavaş olacağından paslanmaz çeliklerde görülen delta ferrit ve sigma fazı gibi sertlik arttırıcı fazların oluşma ihtimali artmaktadır.

Kaynak işleminde numuneye uygulanan lazer gücü arttıkça eğme dayanımı genel anlamda artmaktadır. Ayrıca, elde edilen sonuçlara göre kaynak hızı arttıkça eğme dayanımı genel anlamda azalmaktadır. Lazer gücü ve kaynak hızının ısı girdisine olan etkileri göz önüne alındığında kaynak işlemi sırasında numuneye uygulanan ısı girdisi arttıkça eğme dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Isı girdisindeki artışla beraber kaynak bölgesinin soğuma süresi artar. Bu durum ferrit oluşumunu arttırır ve aynı zamanda sıcak çatlak riskini azaltır. Dolayısıyla ısı girdisinin artmasıyla sıcak çatlak riski azalmakta, eğme dayanımı artmaktadır [50]. Ayrıca, deney malzemesinde bulunan Mn, yüksek sıcaklıklarda ferrit oluşumunu arttırmaktadır. Bu olay, ısı girdisi arttıkça eğme dayanımındaki artışı destekler [45].

5.2. Sonuçlar

Bu alışmada AISI 304 paslanmaz elik numunelerin CO₂ lazer kaynağıyla birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkileri metalografik incelemeler, mikro sertlik ölçümleri ve üç nokta eğme testleri ile incelenmiştir. Deneysel alışmada, Rofin – Sinar marka maksimum çıkış gücü 4 kW olan sürekli mod CO₂ lazer tezgahı kullanılmıştır. Bu işlem için özel bir kalıp tasarlanmış ve kaynak işleminin sağlıklı şekilde yapılması sağlanmıştır. Yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Kaynak bölgelerinde malzeme kalınlığı boyunca tam nüfuziyet elde edilmiştir. Kaynak metal, üstten alta doğru daralan düzensiz konik bir yapıdadır. Katılaştıran kaynak metal, anahtar deliği formundadır. Hiçbir kaynak metalinde gözenek oluşumu gözlenmemiştir.
2. Kaynak hızının artmasıyla kaynak metal genişliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Kaynak hızı arttıkça kaynak metalinde yüzey ve kök genişlikleri arasındaki farkın arttığı tespit edilmiştir.
3. Katılaştıran kaynak metalinde östenit fazı ile tane ve alt tane sınırlarında oluşan ferrit fazı tespit edilmiştir. Martenzit başlama sıcaklığı $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğundan martenzit görülmemektedir. Kaynak hızı arttıkça kaynak metalinde katılaştıran tanelerin büyüme doğrultuları ile kaynak merkez çizgisi arasındaki açı azalmaktadır.
4. Kaynak hızı arttıkça geçiş bölgesi genişliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Geçiş bölgesi, dikiş yüzeyi ve dikiş kökünde de farklılık göstermektedir. Dikiş yüzeyinde ısı girdisinin etkisiyle geçiş bölgesi daha geniş olurken, dikiş kökünde geçiş bölgesinin daha dar olduğu tespit edilmiştir.
5. ITAB'ta kaynak metalinden esas metale doğru uzanan yatay doğrultuda ferrit bantları tespit edilmiştir. Bu oluşumlar, katılaştırmayla beraber kaynak metalinden uzaklaşan ısı ITAB'ta ve esas metalde oluşturduğu ısı dağılım hatlarıdır. Kaynak hızı arttıkça bu bölgede oluşan ferrit bantlarının uzunlukları azalmış, daha az yoğunlukta süresiz şekilde oluşmuşlardır. Lazer gücü arttıkça bu bölgede östenit tane sınırları boyunca uzanan ferrit bantlarının daha fazla yoğunlukta ve yüksek lazer güçlerinde sürekli şekilde oluştuğu tespit edilmiştir.
6. Kaynak metalinin sertliği, geçiş bölgesi ve esas metalin sertliklerinden yüksektir. Geçiş bölgesinin sertliği esas metalin sertliğinden yüksektir. Örneğin, 10 l/dk koruyucu gaz debisi, 1000 W lazer gücü ve 200 mm/dk kaynak hızı uygulanan

numuneye ait kaynak metali sertliği 207 HV, geçiş bölgesi sertliği 197 HV olarak tespit edilmiştir.

7. Kaynak işleminde numuneye uygulanan lazer gücü arttıkça kaynak metali sertliğinin genel anlamda arttığı tespit edilmiştir. Örneğin, 10 l/dk koruyucu gaz debisi ve 100 mm/dk kaynak hızı uygulanan numunelerde 1000 W lazer gücünde kaynak metali sertliği 194 HV, 2000 W lazer gücünde 202 HV, 3000 W lazer gücünde 208 HV ve 4000 W lazer gücünde 211 HV olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, kaynak hızının artmasıyla kaynak metal sertliğinin genel anlamda azaldığı belirlenmiştir. Örneğin, 16 l/dk koruyucu gaz debisi ve 4000 W lazer gücü uygulanan numunelerde 100 mm/dk kaynak hızında kaynak metali sertliği 212 HV, 200 mm/dk kaynak hızında 205 HV, 300 mm/dk kaynak hızında 201 HV ve 400 mm/dk kaynak hızında 196 HV olarak tespit edilmiştir. Lazer gücü ve kaynak hızının ısı girdisine olan etkileri göz önüne alındığında ısı girdisi arttıkça kaynak metali sertliğinin genel anlamda arttığı görülmektedir.
8. Kaynak işleminde numuneye uygulanan lazer gücü arttıkça eğme dayanımı genel anlamda artmaktadır. Örneğin, 16 l/dk koruyucu gaz debisi ve 200 mm/dk kaynak hızı uygulanan numunelerde 1000 W lazer gücünde eğme dayanımı 1035 MPa, 2000 W lazer gücünde 1046 MPa, 3000 W lazer gücünde 1062 MPa ve 4000 W lazer gücünde 1077 MPa olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, elde edilen sonuçlara göre kaynak hızı arttıkça eğme dayanımı genel anlamda azalmaktadır. Örneğin, 14 l/dk koruyucu gaz debisi ve 2000 W lazer gücü uygulanan numunelerde 100 mm/dk kaynak hızında eğme dayanımı 1072 MPa, 200 mm/dk kaynak hızında 1060 MPa, 300 mm/dk kaynak hızında 1052 MPa ve 400 mm/dk kaynak hızında 1043 MPa olarak tespit edilmiştir. Lazer gücü ve kaynak hızının ısı girdisine olan etkileri göz önüne alındığında kaynak işlemi sırasında numuneye uygulanan ısı girdisi arttıkça eğme dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Tarakçıoğlu, N., Özcan, M., “Lazerler ve materyal işleme uygulamaları, 1. baskı”, *Atlas Yayın*, İstanbul, 3-128 (2004).
2. Gordon, R.G., "The laser, light amplification by stimulated emission of radiation", *University of Michigan Press*, 1:128-136 (1959).
3. Shawlow, A.L., Townes, C.H., “Infrared and optical masers”, *Physical Review*, 112 (6):84-94 (1958).
4. Maiman, T.H., “Optical and microwave optical experiments in ruby”, *Physical Review Letters*, 4 (11):554-557 (1960).
5. Sorokin, P.P., Stevenson, M.J., “Advances in quantum Electronics, 2nd ed.”, *Columbia University Press*, New York, 64-89 (1961).
6. Javan, A., Bennett, W. R., Herriott, D. R., "Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture", *Physical Review Letters*, 6 (3):106-110 (1961).
7. Patel, C.K.N., "Continuous-wave laser action on vibrational-rotational transitions of CO₂", *Physical Review*, 136 (5A):1187-1193 (1964).
8. Geusic, J.E., Marcos, H.M, Van Uitert, L.G., "Laser oscillations in nd-doped yttrium aluminum, yttrium gallium and gadolinium garnets", *Applied Physics Letters*, 4 (10):182-184 (1964).
9. Bridges, W.B., "Laser oscillation in singly ionized argon in the visible spectrum", *Applied Physics Letters*, 4:128-130 (1964).
10. Kulh, K.J., “Laser engineering, 1st ed.”, *Prentice Hall*, New York, 3-34 (1998).
11. Erdoğan, Ş., “Lazerle delmede işleme parametrelerinin delik kalitesine olan etkisinin deneysel araştırması”, *Makine Teknik Dergisi*, 19:47-58 (2007).
12. Benyounis, K.Y., Olabi, A.G., Hashmi, M.S.J., “Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile”, *Journal of Materials Processing Technology*, 164:978-985 (2005).
13. Benyounis, K.Y., Olabi, A.G., Hashmi, M.S.J., “Multi-response optimization of CO₂ laser-welding process of austenitic stainless steel”, *Optics Laser Technology*, 40:76-87 (2008).
14. Quan, Y.J., Chen, Z.H., Gong, X.S., Yu, Z.H., “Effects of heat input on microstructure and tensile properties of laser welded magnesium alloy AZ₃”, *Materials Characterization*, 59 (10):1491-1497 (2008).

15. Costa, A.P., Quintino, L., Greitmann, M., “Laser beam welding hard metals to steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 141:163-173 (2003).
16. Zambon, A., Ferro P., Bonollo, F., “Microstructural, compositional and residual stress evaluation of CO₂ laser welded superaustenitic AISI 904L stainless steel”, *Materials Science and Engineering*, A424:117-127 (2006).
17. Wu, Q., Gong, J., Chen, G., Xu, L., “Research on laser welding of vehicle body”, *Optics & Laser Technology*, 40:420-426 (2008).
18. Tani, G., Campana, G., Fortunato, A., Ascari, A., “The influence of shielding gas in hybrid laser–MIG welding”, *Applied Surface Science*, 253:8050-8053 (2007).
19. Chung, B.G., Rhee, S., Lee, C.H., “The effect of shielding gas types on CO₂ laser tailored blank weldability of low carbon automotive galvanized steel”, *Materials Science and Engineering*, A272:357-362 (1999).
20. Mei, L., Chen, G., Jin, X., Zhang, Y., Wu, Q., “Research on laser welding of high-strength galvanized automobile steel sheets”, *Optics and Lasers in Engineering*, 47:1117-1124 (2009).
21. Yan, J., Gao, M., Zeng, X., “Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding”, *Optics and Lasers in Engineering*, 48:1157-1164 (2009).
22. Caiazzo, F., Curcio, F., Daurelio, G., Minutolo, F.M.C., “Ti₆Al₄V sheets lap and butt joints carried out by CO₂ laser: mechanical and morphological characterization”, *Journal of Materials Processing Technology*, 149:546-552 (2004).
23. Yılbaş, B.S., Arif, A.F.M., AbdulAleem, B.J., “Laser welding of low carbon steel and thermal stress analysis”, *Optics & Laser Technology*, 42 (5):760-768 (2009).
24. Durmuş, H., Meriç, C., “Weldability of Al99-SiC composites by CO₂ laser welding”, *Journal of Composite Materials*, 43:1435-1450 (2009).
25. Tokdemir, M., “Lazer kaynağı ile birleştirilmiş demir esaslı t/m malzemelerin kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 95-96 (2007).
26. Keskin, M.S., “Östenitik paslanmaz çeliğin lazer kaynağı yöntemiyle birleştirilmesinin incelenmesi”, 5. *Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, 940-942 (2009).

27. Loudon, R., "The quantum theory of light, 1st ed.", **Clarendon Press**, Oxford, 43-55 (1973).
28. Yariv, A., "Quantum Electronics, 1st ed.", **John Wiley and Sons**, New York, 56-78 (1989).
29. Silfvast, T.W., "Laser fundamentals, 1st ed.", **Cambridge University Press**, U.K., 23-68 (1997).
30. Wang, J., Olesan, H., Stubkjar, K.E., "Recombination, gain and bandwidth characteristics of 1.3 μm semiconductor laser amplifiers", **IEEE J. Lightwave Technol**, 1:184-189 (1987).
31. Mitchell, A.C.G., Zemonsky, M.W., "Resonance radiation and excited atoms, 1st ed.", **Cambridge University Press**, U.K., 3-89 (1961).
32. Yamamoto, Y., Mukai, T., "Fundamental of optical amplifiers", **Opt. Quantum Electron**, 21:1-14 (1989).
33. Willet, C.S., "Introduction to gas lasers, population inversion mechanism, 1st ed.", **Oxford**, Pergamon, 36-95 (1974).
34. Shimoda, K., "Introduction to laser physics, 2nd ed.", **Spiringer**, Berlin, 35-76 (1986).
35. Güven, O., Ünal, S., "Lazer kesme", **Mühendis ve Makine Dergisi**, 507 (43):41-44 (2002).
36. Trumpf, C., "Ti welding of aluminium and aluminium alloys, 1st ed.", **Trumpf Co.**, Ditzingen, 14-45 (1998).
37. Karaaslan, A., Yumurtacı, S., Sözmez, N., "Lazer ışını ile birleştirilmiş farklı malzemelerin kaynak dikişlerinde sertlik değişimleri", **II Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Sempozyumu**, Manisa, 54-59 (2001).
38. Yavuz, H., Çam, G., "Lazer-ark hibrit kaynak yöntemi", **Mühendis ve Makine**, 46:14-19 (2003).
39. Beersiek, J., "On-line monitoring of keyhole instabilities during laser beam welding, 1st ed.", **Prometec GmbH**, Aerchan, 78-99 (1999).
40. Nath, A.K., Sridhar, R., Ganesh, R., Kaul, R., "Laser power coupling efficiency in conduction and keyhole welding of austenitic stainless steel", **Sadhana**, 27:383-392 (2002).
41. Wilson, J., Hawkes, J.B.F., "Laser principles and applications, 1st ed.", **Prentice Hall**, U.K., 3-24 (1987).

42. Mazumder, J., Kar, A., "Theory and application of laser chemical vapor deposition", *Plenium Press*, 80:81-84 (1995).
43. Sten, W.M., "Laser materials processing, 2nd ed.", *Springer-Verlag*, London, 9-67 (1991).
44. Ertek, C., "Plazma ortamında iyon aşılınmış 304 ve 316 L paslanmaz çeliklerin korozyon davranışlarının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 54-58 (2006).
45. Odabaş, C., "Paslanmaz çelikler, temel özellikleri, kullanım alanları, kaynak yöntemleri, 1. baskı", *Askaynak*, İstanbul, 4-45 (2004).
46. Folkhard, E., "Welding metallurgy of stainless steels, 1st ed.", *Springer Verlag*, Austria, 9-169 (1988).
47. Arkun, E., "Paslanmaz çelik saclarda şekillendirme karakteristikleri", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 64-67 (2006).
48. Abuç, S., "Östenitik paslanmaz çeliklerin gazaltı kaynak yöntemi ile kaynağında koruyucu gazın mekanik özelliklere etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 54-67 (2006).
49. Kaluç, E., "Paslanmaz çeliklerin kaynağı, 1. baskı", *Gedik Holding Kaynak Dünyası*, İstanbul, 1-22 (1996).
50. Aran, A., Temel, M.A., "Paslanmaz çelik, 1. baskı", *Acar*, İstanbul, 31-35 (2004).
51. Davis, J. R., "Stainless steel asm specialty handbook, 2nd ed.", *ASM International*, Ohio, 1-576 (1995).
52. Avner, S.H., "Introduction to physical metallurgy", *Mc Graww-Hill*, London, 3-68 (1974).
53. Tülbentçi, K., "MIG/MAG gazaltı kaynak yöntemi, 1. baskı", *Arctech*, İstanbul, 56-58 (1998).
54. Tülbentçi, K., "Paslanmaz çeliklerin kaynağı, 1. baskı", *Böhler Kaynak Dünyası*, 5-10 (1985).
55. Castner, H.R., "Material and procedure considerations for welded austenitic stainless steels", *8th Annual North American Welding Research Conference*, Ohio, 1-6 (1992).

56. Kaluç, E., “Östenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin kaynağı, 2. baskı”, ***Gedik Kaynak Dünyası***, 18-21 (1996).
57. Anık, S., Vural, M., “1000 soruda kaynak teknolojisi, 2. baskı”, ***Birsen Yayınları***, İstanbul, 355-357 (1993).
58. Kurt, U., “Paslanmaz çelik kaynak özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 2-33 (1988).
59. Kahraman, N., Durgutlu, A., Gülenç, B., “316L paslanmaz çeliğin TIG kaynağında koruyucu argon gazına hidrojen ilavesinin kaynak bölgesi tane morfolojisine etkilerinin araştırılması”, ***Politeknik Dergisi***, 7 (3):223-228 (2004).
60. Kaluç, E., Tülbentçi, K., “Paslanmaz çelikler ve kaynaklanabilirliği”, ***Kocaeli Üniversitesi Kaynak Teknolojisi Araştırma, Eğitim ve Uygulama Merkezi***, Kocaeli, 239-245 (1995).
61. El-Batahgy, A.M., “Effect of laser welding parameters on fusion zone shape and solidification structure of austenitic stainless steels”, ***Materials Letters***, 32:155-163 (1997).
62. Akman, E., “Ti₆Al₄V titanyum alaşımlarının atımlı Nd:yag lazeri kullanılarak kaynak edilmesi ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, ***Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Kocaeli, 34-48 (2006).
63. Durmuş, H., “CO₂ lazer kaynağıyla birleştirilmiş alüminyum matriksli kompozitlerin kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, ***Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Manisa, 45-62 (2006).
64. Gao, M., Zeng, X., Hu, Q., “Effect of shielding parameters on weld penetration of CO₂ laser-TIG hybrid welding”, ***Journal of Materials Processing Technology***, 184:177-183 (2007).
65. Quntino, L., Costa, A., Miranda, R., Yapp, D., Kumar, V., Kong, C. J., “Welding with high power fiber lasers, a preliminary study”, ***Materials and Design***, 28:1231-1237 (2007).
66. Çelen, S., “Paslanmaz çeliklerin lazer kaynağında kaynak parametrelerinin bağlantının dayanım ve korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, ***Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İzmir, 78-83 (2006).
67. Kou, S., “Welding metallurgy, 1st ed.”, ***John Wiley Sons Inc.***, Canada, 34-167 (1987).

68. Lippold, J.C., Katecki, D.J., “Welding metallurgy and weldability of stainless steels, 1st ed.”, **John Wiley & Sons Inc**, New Jersey, 141-229 (2005).
69. Çalık, A., “Elektron ışın kaynağı ile birleştirilmiş iki farklı çelik malzemenin kaynak bölgesinin incelenmesi”, Doktora Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 56-67 (2004).
70. Metzger, G., Lison, R., “Electron beam welding of dissimilar metals”, **Welding Research Supplement**, 35:230-240 (1976).
71. Shubert, E., Kalssen, M., Zerner, I., Walz, C., Sepold, G., “Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry”, **Journal of Materials Processing Technology**, 115:2-8 (2001).
72. Li, A., Fontana, G., “Autogenous laser welding of stainless steel to free-cutting steel for the manufacture of hydraulic valves”, **Journal of Materials Processing Technology**, 74:174-182 (1998).
73. Li, Z., Gobbi, S. L., Loreau, J. H., “Laser welding of waspaloy sheets for aero engines”, **Journal of Materials Processing Technology**, 65:183-190 (1997).

EKLER

EK – 1. Deneysel çalışmada kullanılan AISI 304 paslanmaz çelik malzemeye ait sertifika

 UGINE & ALZ Belgium NV Maatschappelijke zetel Genk-Zuid : Zone 6A, Swinnenwijerweg 5, B 3600 Genk Tel. (089) 30 21 11 - Telefax (089) 30 23 80 Telex 39058 aldozg b H.R. Tongeren nr 41.051 - B.T.W. nr BE 401.277.914		MILL CERTIFICATE BS EN 10204/3.1 CERTIFICAT DE RECEPTION NF EN 10204/3.1 ABNAHMEPRUEFZEUGNIS DIN EN 10204/3.1 Approved as supplier according to AD2000- WO - TRD 100 statement W E 603 certified acc. PED (97/23/EC) by TÜV , NB 0035		N-Nr-N 2006K0008717																																		
Manufacturer's works order number N° de la commande usine productrice Werksauftragsnummer 5UA560232/05-91255/187/05 Packing list: 2006K605769		Surveyor's mark Cachet de l'expert Stempel des Werkssachverständigen U & A		Purchaser and/or consignee Client et/ou destinataire Besteller und/oder Empfänger 2M METAL MAKINA VE DIS TIC.																																		
Product - Produit - Erzeugnis SHEETS, COLD ROLLED, FINISH 2 B TOILES, LAMINEES A FROID, FINI 2B BLECHE, KALTGEWALZT, GEGLÜHT+GEBEIZT, LEICHT NACHGEWALZT		AKCAY CD. 144/1 EGE SERB. BVLG GAZIEMIR/IZMIR		Purchaser's order number N° de commande client Kundenbestellnummer P 5091																																		
Steel designation Désignation de l'acier Stahlbezeichnung ASTM A 240 (A4 - 05A TYPE 304		Finish Présentation Ausführung 2B		Product delivery condition Etat de livraison du produit Lieferzustand Solution treated: Hypertempe: Lösungsgegl+abgeschreckt. 1050 C																																		
Identification of the product Identification du produit-Identifizierung des Erzeugnisses		Dimensions Dimensions - Abmessungen		Number of pieces Nombre de pièces - Stueckzahl 124																																		
Coil n. N° de bobine - Band Nr 60302752		Heat n. N° de coulée - Schmelz Nr 603027		Thickness Epaisseur - Dicke 2.00 mm																																		
Width Largeur - Breite 1250.00 mm		Length Longueur - Länge 2500.00 mm		Net weight Poids net - Netto Gewicht 6144 KG																																		
CHEMICAL ANALYSIS - ANALYSE CHIMIQUE - CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG																																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>Ni</th> <th>Cr</th> <th>Mo</th> <th>Ti</th> <th>N</th> <th>S</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Required-Exigé Anforderung</td> <td>% mini % maxi</td> <td></td> <td></td> <td>8.00 10.50</td> <td>18.00 20.00</td> <td></td> <td></td> <td>0.100 0.030</td> <td>0.030 0.045</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cast Analysis Analyse coulée Analyse Schmelze</td> <td>0.047</td> <td>0.48</td> <td>1.14</td> <td>8.09</td> <td>18.22</td> <td></td> <td></td> <td>0.062</td> <td>0.003</td> <td>0.026</td> </tr> </tbody> </table>							C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Ti	N	S	P	Required-Exigé Anforderung	% mini % maxi			8.00 10.50	18.00 20.00			0.100 0.030	0.030 0.045		Cast Analysis Analyse coulée Analyse Schmelze	0.047	0.48	1.14	8.09	18.22			0.062	0.003	0.026
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Ti	N	S	P																												
Required-Exigé Anforderung	% mini % maxi			8.00 10.50	18.00 20.00			0.100 0.030	0.030 0.045																													
Cast Analysis Analyse coulée Analyse Schmelze	0.047	0.48	1.14	8.09	18.22			0.062	0.003	0.026																												
Tests to verify batch and quality have been carried out: OK Tests de vérification de la conformité de la nuance fournie: OK Messwechselungsprüfung wurde durchgeführt: OK																																						
MECHANICAL PROPERTIES - PROPRIETES MECANQUES - MECHANISCHE WERTE ASTM A370																																						
Room temperature - Température ambiante - Raumtemperatur																																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Direction (2)</th> <th>Yield strength Limite d'élasticité Dehngrenze MPa</th> <th>Tensile strength Résistance à la traction Zugfestigkeit MPa</th> <th>Elongation after fracture (A) Allongement après rupture Bruchdehnung %</th> <th>Hardness Dureté Haerte</th> <th>Yield strength Limite d'élasticité Dehngrenze MPa</th> <th>Tensile str. Résist. MPa Zugfestigkeit</th> <th>Elongation % Allongement Bruchdehnung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Required Exigé Anforderung</td> <td>Rp 0.2 % Rp 1 %</td> <td>Rm</td> <td>50 mm</td> <td>HRB C30</td> <td>Rp 0.2 % Rp 1 %</td> <td>Rm</td> <td>50 mm</td> </tr> <tr> <td>1 T</td> <td>205</td> <td>515</td> <td>40</td> <td>92</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Obtained Obtenu Ergebnisse</td> <td>345</td> <td>370</td> <td>46</td> <td>90</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Direction (2)	Yield strength Limite d'élasticité Dehngrenze MPa	Tensile strength Résistance à la traction Zugfestigkeit MPa	Elongation after fracture (A) Allongement après rupture Bruchdehnung %	Hardness Dureté Haerte	Yield strength Limite d'élasticité Dehngrenze MPa	Tensile str. Résist. MPa Zugfestigkeit	Elongation % Allongement Bruchdehnung	Required Exigé Anforderung	Rp 0.2 % Rp 1 %	Rm	50 mm	HRB C30	Rp 0.2 % Rp 1 %	Rm	50 mm	1 T	205	515	40	92				Obtained Obtenu Ergebnisse	345	370	46	90				
Direction (2)	Yield strength Limite d'élasticité Dehngrenze MPa	Tensile strength Résistance à la traction Zugfestigkeit MPa	Elongation after fracture (A) Allongement après rupture Bruchdehnung %	Hardness Dureté Haerte	Yield strength Limite d'élasticité Dehngrenze MPa	Tensile str. Résist. MPa Zugfestigkeit	Elongation % Allongement Bruchdehnung																															
Required Exigé Anforderung	Rp 0.2 % Rp 1 %	Rm	50 mm	HRB C30	Rp 0.2 % Rp 1 %	Rm	50 mm																															
1 T	205	515	40	92																																		
Obtained Obtenu Ergebnisse	345	370	46	90																																		
Impact strength test Essai de résilience Kerbschlagzähigkeitstest																																						
Corrosion test Test de corrosion Korrosionstest																																						
ASTM A262 E - 02A.E3:OK																																						
Internal Cleanliness: A: B: C: D: C57																																						
Location of the sample (1) Emplacement de l'échantillon Lage des Probenabschnittes 1. Front - Début - Anfang 2. Back - Fin - Ende 3. Middle - Milieu - Mitte																																						
The delivery is in accordance with the order La fourniture est conforme aux exigences de la commande Die Lieferung entspricht den Bestellbedingungen																																						
Organisation inspection Organisme et/ou service contrôle Überwachungsabteilung Metallurgical Department 10/02/2006 J. VANTRAPPEN																																						
Direction of the test pieces (2) Orientation des éprouvettes Probenrichtung T. Transverse - Travers - Quer L. Longitudinal - long - laengs																																						
Marking, inspection and measurement: without objection Contrôle de marquage, d'aspect et de dimensions: satisfaisants Prüfung der Stempelung, des Oberflächenaspekts und der Abmessungen: ohne Beanstandung																																						
The inspector Le responsable Der Werkssachverständige																																						

EK – 2. Deneysel çalışmada elde edilen kaynak metali genişlikleri

Çizelge 2.1. Kaynak metali genişlikleri

Numune No	Koruyucu gaz Debisi (l/dk)	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/dk)	Kaynak Metali Yüzey Genişliği (mm)	Kaynak Metali Kök Genişliği (mm)
01	10	1000	100	1,88	1,58
02	10	1000	200	1,19	0,88
03	10	1000	300	1,11	0,53
04	10	1000	400	1,08	0,46
05	10	2000	100	1,77	1,75
06	10	2000	200	1,32	0,78
07	10	2000	300	1,11	0,49
08	10	2000	400	1,08	0,46
09	10	3000	100	1,88	1,53
10	10	3000	200	1,27	0,66
11	10	3000	300	1,09	0,49
12	10	3000	400	1,06	0,50
13	10	4000	100	1,54	1,69
14	10	4000	200	1,19	0,92
15	10	4000	300	1,16	0,53
16	10	4000	400	1,06	0,49
17	12	1000	100	1,73	1,64
18	12	1000	200	1,24	0,70
19	12	1000	300	1,09	0,52
20	12	1000	400	0,98	0,41
21	12	2000	100	1,78	1,53
22	12	2000	200	1,25	0,73
23	12	2000	300	1,12	0,52
24	12	2000	400	0,99	0,44
25	12	3000	100	1,84	1,51
26	12	3000	200	1,28	0,73
27	12	3000	300	1,01	0,44
28	12	3000	400	1,03	0,58
29	12	4000	100	1,79	1,47
30	12	4000	200	1,25	0,63
31	12	4000	300	1,16	0,48
32	12	4000	400	0,92	0,34

EK – 2. (Devam) Deneysel çalışmada elde edilen kaynak metali genişlikleri

Çizelge 2.1. (Devam) Kaynak metali genişlikleri

Numune No	Koruyucu gaz Debisi (l/dk)	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/dk)	Kaynak Metali Yüzey Genişliği (mm)	Kaynak Metali Kök Genişliği (mm)
33	14	1000	100	1,63	1,56
34	14	1000	200	1,42	0,82
35	14	1000	300	1,10	0,44
36	14	1000	400	0,97	0,44
37	14	2000	100	1,75	1,54
38	14	2000	200	1,27	0,80
39	14	2000	300	1,11	0,50
40	14	2000	400	1,12	0,37
41	14	3000	100	1,81	1,60
42	14	3000	200	1,29	0,73
43	14	3000	300	1,08	0,51
44	14	3000	400	1,02	0,46
45	14	4000	100	1,85	1,41
46	14	4000	200	1,30	0,78
47	14	4000	300	1,13	0,52
48	14	4000	400	0,99	0,40
49	16	1000	100	1,76	1,55
50	16	1000	200	1,20	0,74
51	16	1000	300	1,11	0,44
52	16	1000	400	0,96	0,38
53	16	2000	100	1,71	1,52
54	16	2000	200	1,35	0,73
55	16	2000	300	1,14	0,55
56	16	2000	400	1,20	0,41
57	16	3000	100	1,70	1,69
58	16	3000	200	1,22	0,68
59	16	3000	300	1,10	0,46
60	16	3000	400	1,15	0,43
61	16	4000	100	1,76	1,53
62	16	4000	200	1,32	0,76
63	16	4000	300	1,15	0,54
64	16	4000	400	0,86	0,44

EK – 3. Deneysel çalışmada elde edilen mikro sertlik sonuçları

Çizelge 3.1. Kaynak metali sertlikleri

Numune No	Koruyucu gaz Debisi (l/dk)	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/dk)	1. Sertlik (HV)	2. Sertlik (HV)	3. Sertlik (HV)	Ortalama Sertlik (HV)
01	10	1000	100	196	193	194	194
02	10	1000	200	197	206	217	207
03	10	1000	300	208	195	203	202
04	10	1000	400	203	194	193	197
05	10	2000	100	203	198	204	202
06	10	2000	200	195	203	200	199
07	10	2000	300	195	197	203	198
08	10	2000	400	205	196	197	199
09	10	3000	100	206	210	205	208
10	10	3000	200	210	213	208	210
11	10	3000	300	195	200	199	198
12	10	3000	400	193	206	208	202
13	10	4000	100	208	213	212	211
14	10	4000	200	206	212	197	205
15	10	4000	300	214	228	210	217
16	10	4000	400	207	210	197	205
17	12	1000	100	199	206	212	206
18	12	1000	200	198	212	214	208
19	12	1000	300	203	208	201	204
20	12	1000	400	202	191	196	196
21	12	2000	100	217	209	203	210
22	12	2000	200	210	210	210	210
23	12	2000	300	198	201	216	205
24	12	2000	400	193	203	204	200
25	12	3000	100	193	216	214	208
26	12	3000	200	204	204	205	204
27	12	3000	300	199	207	198	201
28	12	3000	400	199	207	209	205
29	12	4000	100	222	214	215	217
30	12	4000	200	203	204	209	205
31	12	4000	300	204	207	195	202
32	12	4000	400	199	208	208	205

EK – 3. (Devam) Deneysel çalışmada elde edilen mikro sertlik sonuçları

Çizelge 3.1. (Devam) Kaynak metali sertlikleri

Numune No	Koruyucu gaz Debisi (l/dk)	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/dk)	1. Sertlik (HV)	2. Sertlik (HV)	3. Sertlik (HV)	Ortalama Sertlik (HV)
33	14	1000	100	192	203	210	202
34	14	1000	200	221	203	203	209
35	14	1000	300	210	197	206	204
36	14	1000	400	201	204	202	202
37	14	2000	100	214	208	195	206
38	14	2000	200	109	215	215	213
39	14	2000	300	198	202	207	202
40	14	2000	400	189	200	188	192
41	14	3000	100	201	211	209	207
42	14	3000	200	210	208	196	205
43	14	3000	300	205	205	208	206
44	14	3000	400	194	200	189	194
45	14	4000	100	222	215	214	217
46	14	4000	200	215	199	205	206
47	14	4000	300	212	212	214	213
48	14	4000	400	190	198	196	195
49	16	1000	100	216	220	220	219
50	16	1000	200	200	202	214	205
51	16	1000	300	206	208	212	209
52	16	1000	400	206	203	204	204
53	16	2000	100	199	209	209	206
54	16	2000	200	197	205	197	200
55	16	2000	300	201	191	201	198
56	16	2000	400	197	190	186	191
57	16	3000	100	212	209	213	211
58	16	3000	200	198	207	200	202
59	16	3000	300	202	202	200	201
60	16	3000	400	195	185	185	188
61	16	4000	100	209	209	217	212
62	16	4000	200	209	199	206	205
63	16	4000	300	203	199	206	201
64	16	4000	400	200	192	195	196

EK – 3. (Devam) Deneysel çalışmada elde edilen mikro sertlik sonuçları

Çizelge 3.2. Geçiş bölgesi sertlikleri

Numune No	Koruyucu gaz Debisi (l/dk)	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/dk)	1. Sertlik (HV)	2. Sertlik (HV)	3. Sertlik (HV)	Ortalama Sertlik (HV)
01	10	1000	100	190	192	188	190
02	10	1000	200	196	202	194	197
03	10	1000	300	191	194	194	193
04	10	1000	400	194	197	201	197
05	10	2000	100	192	192	191	192
06	10	2000	200	195	201	190	195
07	10	2000	300	190	199	197	195
08	10	2000	400	202	197	200	200
09	10	3000	100	192	203	197	197
10	10	3000	200	201	202	200	201
11	10	3000	300	190	198	207	198
12	10	3000	400	197	202	190	196
13	10	4000	100	207	199	196	200
14	10	4000	200	204	198	212	205
15	10	4000	300	215	208	205	209
16	10	4000	400	210	212	199	207
17	12	1000	100	208	204	187	200
18	12	1000	200	200	202	193	198
19	12	1000	300	204	198	198	200
20	12	1000	400	203	203	198	201
21	12	2000	100	191	193	195	193
22	12	2000	200	200	203	199	201
23	12	2000	300	211	201	194	202
24	12	2000	400	207	209	193	203
25	12	3000	100	201	197	199	199
26	12	3000	200	198	196	195	196
27	12	3000	300	202	203	210	205
28	12	3000	400	213	212	208	211
29	12	4000	100	198	201	198	199
30	12	4000	200	196	198	208	201
31	12	4000	300	211	205	210	209
32	12	4000	400	206	193	204	201

EK – 3. (Devam) Deneysel çalışmada elde edilen mikro sertlik sonuçları

Çizelge 3.2. (Devam) Geçiş bölgesi sertlikleri

Numune No	Koruyucu gaz Debisi (l/dk)	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/dk)	1. Sertlik (HV)	2. Sertlik (HV)	3. Sertlik (HV)	Ortalama Sertlik (HV)
33	14	1000	100	192	193	183	189
34	14	1000	200	190	202	190	194
35	14	1000	300	198	211	198	202
36	14	1000	400	206	206	204	205
37	14	2000	100	183	188	187	186
38	14	2000	200	213	205	203	207
39	14	2000	300	205	197	191	198
40	14	2000	400	208	205	193	202
41	14	3000	100	199	196	195	197
42	14	3000	200	202	198	200	200
43	14	3000	300	205	215	209	210
44	14	3000	400	194	199	192	195
45	14	4000	100	208	214	197	206
46	14	4000	200	205	207	199	204
47	14	4000	300	208	219	210	212
48	14	4000	400	199	194	191	195
49	16	1000	100	206	203	198	202
50	16	1000	200	188	202	194	195
51	16	1000	300	209	198	202	203
52	16	1000	400	193	200	196	196
53	16	2000	100	194	193	190	192
54	16	2000	200	192	195	187	191
55	16	2000	300	200	197	189	195
56	16	2000	400	183	198	196	192
57	16	3000	100	195	199	204	199
58	16	3000	200	192	191	189	191
59	16	3000	300	201	196	198	198
60	16	3000	400	194	194	194	194
61	16	4000	100	198	198	188	195
62	16	4000	200	199	208	199	202
63	16	4000	300	199	193	197	196
64	16	4000	400	199	203	190	197

EK – 3. (Devam) Deneysel çalışmada elde edilen mikro sertlik sonuçları

Çizelge 3.3. Esas metal sertlikleri

Numune No	Koruyucu gaz Debisi (l/dk)	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/dk)	1. Sertlik (HV)	2. Sertlik (HV)	3. Sertlik (HV)	Ortalama Sertlik (HV)
01	10	1000	100	185	183	184	184
02	10	1000	200	188	188	179	185
03	10	1000	300	185	187	182	185
04	10	1000	400	190	182	177	183
05	10	2000	100	186	184	180	183
06	10	2000	200	181	174	173	176
07	10	2000	300	175	177	176	176
08	10	2000	400	177	177	175	176
09	10	3000	100	184	190	188	187
10	10	3000	200	182	183	188	184
11	10	3000	300	187	179	179	182
12	10	3000	400	184	184	182	183
13	10	4000	100	186	182	187	185
14	10	4000	200	181	190	193	188
15	10	4000	300	191	195	184	190
16	10	4000	400	199	194	189	194
17	12	1000	100	182	181	185	183
18	12	1000	200	178	182	183	181
19	12	1000	300	181	185	186	184
20	12	1000	400	183	187	175	182
21	12	2000	100	181	190	188	186
22	12	2000	200	188	192	197	192
23	12	2000	300	183	185	187	185
24	12	2000	400	179	172	179	177
25	12	3000	100	183	185	185	184
26	12	3000	200	179	189	184	184
27	12	3000	300	188	183	179	183
28	12	3000	400	190	197	195	194
29	12	4000	100	188	193	194	192
30	12	4000	200	186	181	173	180
31	12	4000	300	191	177	183	184
32	12	4000	400	182	185	179	182

EK – 3. (Devam) Deneysel çalışmada elde edilen mikro sertlik sonuçları

Çizelge 3.3. (Devam) Esas metal sertlikleri

Numune No	Koruyucu gaz Debisi (l/dk)	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/dk)	1. Sertlik (HV)	2. Sertlik (HV)	3. Sertlik (HV)	Ortalama Sertlik (HV)
33	14	1000	100	174	179	184	179
34	14	1000	200	176	179	180	178
35	14	1000	300	180	187	187	185
36	14	1000	400	184	193	179	185
37	14	2000	100	183	184	183	180
38	14	2000	200	181	185	190	185
39	14	2000	300	183	183	186	184
40	14	2000	400	174	176	183	178
41	14	3000	100	190	177	189	185
42	14	3000	200	178	177	177	177
43	14	3000	300	188	191	187	189
44	14	3000	400	184	173	178	178
45	14	4000	100	193	189	191	191
46	14	4000	200	181	175	184	180
47	14	4000	300	199	192	192	194
48	14	4000	400	176	170	171	172
49	16	1000	100	193	194	190	192
50	16	1000	200	177	179	177	178
51	16	1000	300	186	187	174	182
52	16	1000	400	176	179	181	179
53	16	2000	100	180	179	184	181
54	16	2000	200	174	175	170	173
55	16	2000	300	180	181	178	180
56	16	2000	400	177	181	178	179
57	16	3000	100	187	188	188	188
58	16	3000	200	173	176	175	175
59	16	3000	300	180	179	177	179
60	16	3000	400	171	170	176	172
61	16	4000	100	176	177	187	180
62	16	4000	200	186	181	179	182
63	16	4000	300	183	180	183	182
64	16	4000	400	174	174	169	172

EK – 4. Deneysel çalışmada elde edilen eğme dayanımı sonuçları

Çizelge 4.1. Eğme dayanımları

Numune No	Koruyucu gaz Debisi (l/dk)	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/dk)	Eğme Dayanımı (MPa)
01	10	1000	100	987
02	10	1000	200	1041
03	10	1000	300	1039
04	10	1000	400	1026
05	10	2000	100	1012
06	10	2000	200	1037
07	10	2000	300	1088
08	10	2000	400	1081
09	10	3000	100	1175
10	10	3000	200	1068
11	10	3000	300	1020
12	10	3000	400	1029
13	10	4000	100	1085
14	10	4000	200	1085
15	10	4000	300	1057
16	10	4000	400	1064
17	12	1000	100	1010
18	12	1000	200	1062
19	12	1000	300	1067
20	12	1000	400	1026
21	12	2000	100	1086
22	12	2000	200	1045
23	12	2000	300	1077
24	12	2000	400	1025
25	12	3000	100	1089
26	12	3000	200	1049
27	12	3000	300	1040
28	12	3000	400	1029
29	12	4000	100	1102
30	12	4000	200	1067
31	12	4000	300	1067
32	12	4000	400	1054

EK – 4. (Devam) Deneysel çalışmada elde edilen eğme dayanımı sonuçları

Çizelge 4.1. (Devam) Eğme dayanımları

Numune No	Koruyucu gaz Debisi (l/dk)	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/dk)	Eğme Dayanımı (MPa)
33	14	1000	100	1060
34	14	1000	200	1046
35	14	1000	300	1043
36	14	1000	400	1033
37	14	2000	100	1072
38	14	2000	200	1060
39	14	2000	300	1052
40	14	2000	400	1043
41	14	3000	100	1101
42	14	3000	200	1040
43	14	3000	300	1026
44	14	3000	400	1021
45	14	4000	100	1053
46	14	4000	200	1038
47	14	4000	300	1060
48	14	4000	400	1020
49	16	1000	100	1083
50	16	1000	200	1035
51	16	1000	300	1042
52	16	1000	400	1009
53	16	2000	100	1083
54	16	2000	200	1046
55	16	2000	300	1047
56	16	2000	400	1066
57	16	3000	100	1106
58	16	3000	200	1062
59	16	3000	300	1054
60	16	3000	400	1054
61	16	4000	100	1108
62	16	4000	200	1077
63	16	4000	300	1047
64	16	4000	400	1031

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : UZUN, Recep Onur
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 18.10.1982 İzmir
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 495 34 40
 Faks : –
 E – mail : receponur@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Celal Bayar Üniversitesi / Makine Müh. Bölümü	2004
Lise	İzmir Özel Tefik Fikret Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2004 – 2006	Atanur Tarım	Makine Müh.
2006 – 2009	Abrates Müh. Ltd. Şti.	Genel Müdür

Yabancı Dil

Fransızca
 İngilizce

Hobiler

Keman, bağlama.