



Derleme / Review Paper

Lazer Kaynağı ve Lazer Kaynağının Başlıca Uygulamaları

Kadir AYDIN¹, İbrahim KARAAĞAÇ²

¹Dumlupınar Üniversitesi, Simav MYO, Kütahya.

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği, Ankara

E posta: kadir.aydin@dpu.edu.tr, ibrahimkaraagac@gazi.edu.tr

Received/Geliş: 17.01.2018

Revised/Düzeltilme: 23.02.2018

Accepted/Kabul: 26.02.2018

Öz: Lazer kaynağı yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir ışınla birleştirme işlemi olup, kaynak enerjisi ışık dalgalarının konsantrasyonu ile sağlanmaktadır. Lazer kaynağı; yüksek kaynak ilerleme hızı, çok düşük ısı girdisi, dar kaynak dikişi, hızlı soğumadan dolayı küçük ısı tesiri altında kalan bölge, otomasyona uygunluk, farklı malzemelerin başarılı kaynağı ve farklı kalınlıktaki malzemeleri birleştirme özellikleri gibi avantajlarından dolayı son dönemde özellikle endüstriyel imalat için önem kazanmaktadır. Bu çalışmada çeşitli sektörlerde sıkça kullanılan aynı veya farklı türdeki sac malzemelerin lazer kaynağı ile birleştirilmesine ait çalışmalar derlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Lazer kaynağı; DP çelikler; TRIP çelikler; Ti alaşımları; Al alaşımları.

Laser Welding and Main Applications of Laser Welding

Abstract: Laser welding is a beam welding process with high energy density and the welding energy is provided by the concentration of light waves. Laser welding; has gained importance especially for industrial manufacturing in recent period due to advantages such as high welding speed, very low heat input, narrow welding seam, small heat affected zone, suitability for automation, successful welding of different materials, and combining materials of different thicknesses. In this study, studies on combining the same or different kinds of sheet materials frequently used in various sectors with laser welding have been compiled.

Keywords: Laser welding; DP steels; TRIP steels; Ti alloys; Al alloys.

1. Giriş

Kaynak ile malzeme birleştirme, özellikle sac metal sektöründe yoğun olarak kullanılan bir üretim yöntemidir. Levha veya blok malzemedan üretilen basit parçalar daha sonra kaynak yardımı ile birleştirilerek daha kompleks parçalara dönüşebilmektedir. Kaynak ile malzeme birleştirmenin temeli, herhangi bir dış enerji kaynağı ile birleştirilecek iki malzemenin birleşim bölgesinin ve eğer varsa dışarıdan eklenecek dolgu malzemesinin yüksek enerji ile ısıtılarak malzemelerin eriyip birbirine birleştirilmesinin sağlanması işlemidir [1-5]. Kaynak yapmak için kullanılan dış enerji kaynaklarından biri de lazer ışınıdır. Lazer ışının diğer enerji kaynaklarından en büyük farkı, parça üzerinde istenen noktaya kolaylıkla ulaştırılabilmesidir. Bu sayede kaynakla birleştirilecek bölgeye istenilen miktarda enerji lokal olarak gönderilebilmektedir [6,7]. Şekil 1’de bir lazer ışın cihazı şematik olarak gösterilmektedir. Enerji kaynağına bağlı güçlü bir lamba ile lazer aktif maddesine ışık pompalanmaktadır. Pompalanan ışık maddenin atomlarını ivmelendirerek manyetik dalgalar halinde proton üretmesini sağlar. Burada lazer aktif maddesi katı, sıvı ve gaz fazında olabilir. Lazer ortamından çıkan lazer ışınları rezonatör aynalar yardımıyla güçlü bir ışık demetine dönüştürülür.

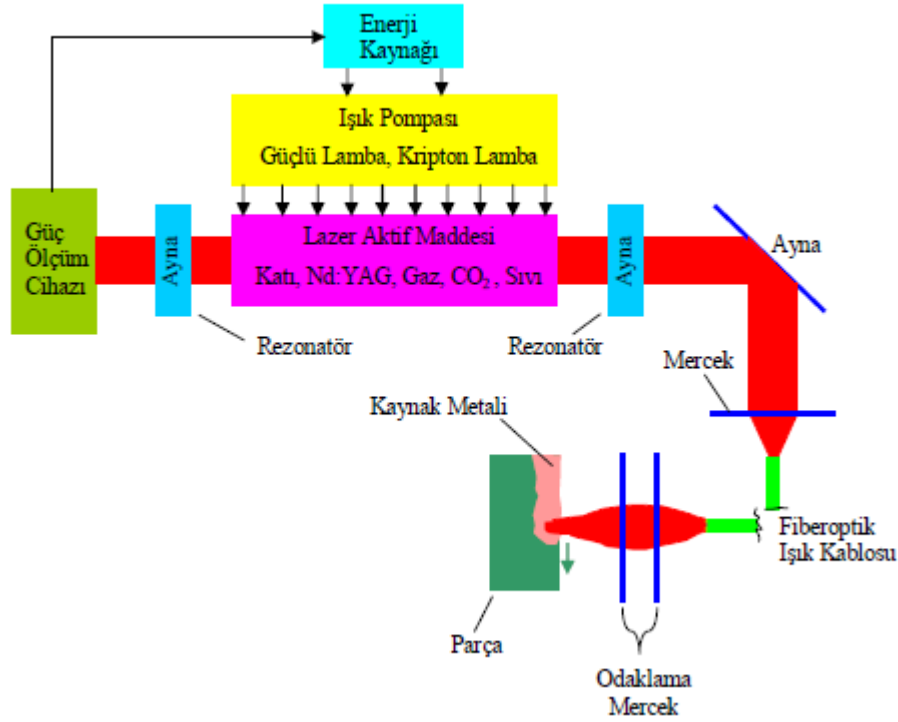
Bu makaleye atıf yapmak için

Aydın, K., Karaağaç, İ., “Lazer Kaynağı ve Lazer Kaynağının Başlıca Uygulamaları” El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2018, 5(2); 693-705.

How to cite this article

Karagöz, İ., “Laser Welding and Main Applications of Laser Welding” El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2018, 5(2); 693-705.

Işık demeti lazer tipine göre ayna ve mercek sistemleri ile veya ışık kablosu yardımıyla istenilen yere iletilmektedir [2].



Şekil 1: Lazer ışın cihazının şematik yapısı[2]

Lazer kaynağı; yüksek kaynak ilerleme hızı, çok düşük ısı girdisi, dar kaynak dikişi, küçük ısıdan etkilenen bölge, otomasyona uygunluk, farklı türdeki malzemelerin başarılı kaynağı ve farklı kalınlıkları kaynatabilme özellikleri ile diğer kaynak yöntemlerine göre daha üstündür. Lazer kaynağının başlıca dezavantajları ise çok yüksek yatırım masrafları, sertleştirilebilir malzemelerde son derece sert kaynak dikişi, kaynak işlemlerinde nüfuziyet derinliğinin 0.1-8 mm arasında olmasından ötürü kalın parçaların kaynağındaki problemler, kullanılan lazerlerin göze veya deriye direkt veya dolaylı olarak temasında ciddi sağlık sorunları oluşturması, özellikle yüksek yansıtma kabiliyetine sahip malzemelerin kaynağında ek tedbirler alınması olarak sıralanmaktadır. Lazer ışın kaynak yönteminde çoğunlukla kullanılan lazer sistemleri iki grupta toplanmaktadır. Bunlar; katı hal lazer sistemleri ve gaz lazer sistemleridir. Lazer kaynağını etkileyen önemli parametreler; lazer gücü, kaynak hızı, odaklama mesafesi, koruyucu gazın özellikleridir [7]. Lazer kaynağında, lazer ışın üreticiden çıkan konsantre enerjinin çeşitli optik malzemeler yardımıyla iki malzemenin birleşme bölgesinde odaklanıp bu bölgenin aşırı ısınma sonucu eriyerek iki malzemenin birleşmesi esastır [2]. Çeşitli uygulamalarda lazer ışını ile kaynak sırasında ilave malzeme eklenebilir veya lazer ışını diğer konvansiyonel yöntemlerle birlikte eşzamanlı olarak uygulanabilmektedir [1,6]. Lazer uygulamaları; araçlar, elektronik malzemeler, çeşitli taşımacılık sistemlerinde ve hafifliğin önemli olduğu uçak ve havacılık sanayinde geniş çapta tercih edilmektedir. Lazer kaynağı Al, Mg, Ti gibi hafif metallere ve birleşimlerine ayrıca çelik ve başkaca metallere uygulanabilmektedir [9]. Lazer kaynağı ayrıca suyun altında da gerçekleştirilebilmektedir. Önceki yıllarda suyun altında ark kaynağı yapılırken, günümüzde lazer kaynağı daha pratik olarak yapılmaktadır [10]. Galvanizli çeliklerin lazer kaynağında çinko elementi istenmeyen buharlaşma meydana getirdiğinden bu malzemelere çiftli lazer kaynak yöntemi uygulanır. Bu yöntemde, parça yüzeyine ilk olarak kesme ışını ve akabinde de kaynak ışını gönderilerek kaynak işlemi yapılmaktadır [11]. Lazer kaynak teknolojisinin kullanılmasıyla birlikte kaynak parametreleri ve kaynak kalitesinin ölçümü de yapılabilmektedir. Bu ileri kaynak teknolojisi sayesinde kontrollü bir kaynak operasyonu ve iyi bir kaynak kalitesi oluşturulabilmektedir [12]. Ayrıca, ileri bir teknolojiye sahip lazer kaynağında kaynak operasyonu sırasında kaynak bölgesinin iç yapısındaki hatalar, görüntüleme teknikleriyle

belirlenebilmektedir [13]. Özellikle Al alaşımlarının lazer kaynağı sırasında yapısındaki Mg ve Zn gibi elementlerin düşük buharlaşma noktasından ötürü gözenekler oluşmaktadır. Bu durum çift gönderilen lazer ışını ile “lazer temizleme” operasyonu gerçekleştirilerek en aza indirilmektedir [14]. Bu çalışmada; farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılan çift fazlı (DP) çelikler, dönüşüm katkılı plastisite gösteren (TRIP) çelikler, titanyum alaşımları ve alüminyum alaşımlarının aynı veya farklı türdeki malzemelerle lazer kaynağı ile birleştirme uygulamaları, ayrıca kaynak parametrelerinin kaynak bölgesinin mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkileri derlenmiştir.

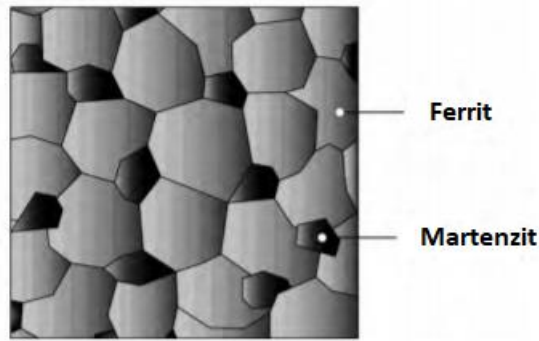
2. Çeşitli malzemelerde lazer kaynağı uygulamaları

Literatür araştırmalarından lazer kaynağı yönteminin; düşük karbonlu çelikler, yüksek dayanımlı çelikler, paslanmaz çelikler, alüminyum alaşımları ve titanyum alaşımları da dahil olmak üzere çeşitli metalik malzemelerin birleştirilmesinde uygulanabildiği belirlenmiştir. Bu çalışmada lazer kaynağı ile ilgili yapılan çalışmalar malzeme tiplerine göre sınıflandırılıp aşağıda bölümler halinde verilmiştir.

2.1. Çift Fazlı (DP) Çeliklerde Lazer Kaynağı Uygulamaları

Otomotiv endüstrisinde çift fazlı (DP) , yüksek dayanıma sahip sac malzemelerin kullanımı oldukça artmıştır. DP çelik sacların kullanılmasıyla araç ağırlıklarında azalma, yakıt tüketiminde düşüş ve buna bağlı olarak çevreye daha az egzoz salınımı gerçekleşmiştir [15,17,18].

DP çelikler üstün özelliklerini metalografik yapısından almaktadır. DP çeliklerde bir fazın üstün özelliklerinden yararlanırken, aynı fazın istenmeyen özellikleri ise başka bir faz yardımı ile denetim altına alınmaktadır. Sert faz olan martenzit fazı gerekli dayanımı sağlarken, yumuşak faz olan ferrit fazı ise sünekliği sağlamaktadır. Böylece her iki özelliğin bir arada bulunması ile dayanım ve süneklik özelliği yüksek olan bir mikro yapı elde edilmiş olmaktadır. Şekil 2’de çift fazlı çeliğe ait iç yapı görüntüsü verilmiştir [15,16].



Şekil 2: Çift fazlı çeliğin iç yapısı [19]

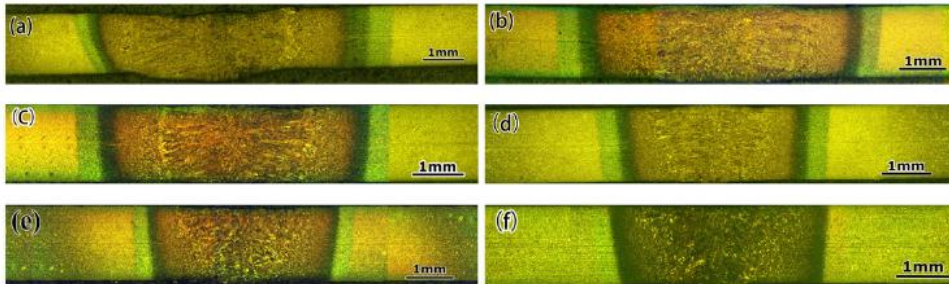
DP çeliklerin aynı tür ve farklı türlerinin lazer kaynağı ile birleştirilmeleri literatürde deneysel olarak araştırılmış kaynak bölgesinin mikroyapı ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Farabi ve diğerleri yaptıkları çalışmada DP600 ve DP980 çift fazlı çelikleri Diot lazer kaynağı ile kaynatıp mikro yapıdaki değişimi ve mekanik özellikleri incelemişlerdir. Malzemeler galvaniz kaplanmış ve her iki malzeme 1.2 mm kalınlığında seçilmiştir. Tablo 1’de çalışmada kullanılan lazer kaynak parametreleri verilmiştir. Proses sonucunda ergime bölgesinde önemli bir sertlik artışı gözlenirken ısıdan etkilenen bölgede daha düşük bir sertlik gözlenmiştir. Yumuşak bölge boyutunun DP980’de, DP600’e göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum birleştirilen malzemede simetrik olmayan bir sertlik profili oluşmasına sebep olmaktadır. Birleştirilmiş parçaların ana metale göre yorulma dayanımları daha düşük gözlenirken daha yüksek gerilim genliklerinde kaynaklı parça yapısında yumuşak bölge bulunmasına rağmen DP600 ana metal ile hemen hemen aynı yorulma dayanımı göstermiştir. Kaynaklı malzemenin akma sınırı ve pekleşme hızı DP600 den daha yüksek iken

DP980 den daha düşük elde edilmiştir. Kaynaklı malzemenin sünekliği ile DP980 ana metali eşdeğer elde edilirken, çekme dayanımı DP600 ana metali ile eşdeğer elde edilmiştir [20].

Tablo 1. DP600-DP980 malzemeler için lazer kaynak parametreleri [20]

Lazer sistemi	Nuvonyx ISL-4000
Lazer kaynağı	Diyot
Lazer gücü (kW)	4
Kaynak hızı (m/min)	1
Odak uzaklığı (mm)	90
Işın boyutu (mm ²)	12x0.9

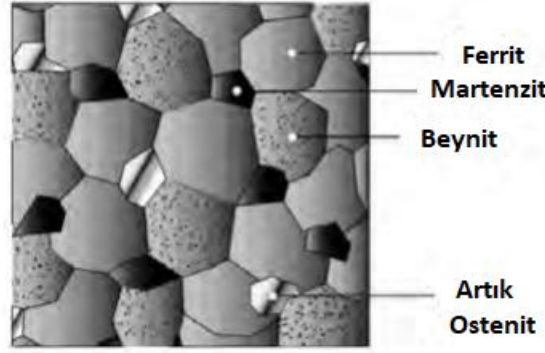
Dong ve diğerleri, DP600 çift fazlı çeliğin lazer kaynağıyla birleştirilmesi sonucu mekanik özellikleri, deformasyon ve kırılma davranışlarını incelemişlerdir. Deney esnasında Nd:YAG katı hal lazer (JHM-1GY-400) kaynağı kullanılmıştır. Çalışmada sac kalınlığı 0.7 mm seçilmiştir. Lazer gücü 400 W, odak mesafesi 100 mm, darbe süresi 3 ms, darbe frekansı 14 Hz, kaynak hızı 1.5 mm/s, darbe akımı 300 A, darbe enerjisi 4.82 J/ms parametreleri kullanılmıştır. Çalışmalarında kaynaklı malzemede ergime bölgesi ve ısıdan etkilenen bölgenin iç tarafında lokal sertleşme ve ısıdan etkilenen bölgenin dış tarafında da lokal yumuşama olduğundan dolayı heterojen bir yapının ortaya çıktığını tespit etmişlerdir. Kaynaklı malzemede çekme kopmasının ısıdan etkilenen bölgenin iç kısmında meydana geldiğini ve ayrıca DP600 ana metal ve kaynaklı malzemede tipik bir sünek kırılma gözlemlendiğini tespit etmişlerdir [21]. Diğer bir çalışmada, Aydemir ve arkadaşları DP1000 1.2 mm kalınlığındaki çift fazlı çeliği uzaktan lazer kaynağı ve direnç nokta kaynağı ile birleştirip çekme ve yorulma özelliklerini inceleyerek karşılaştırılmasını yapmışlardır. Lazer kaynağı olarak uzaktan da kaynak yapabilen Nd:YAG katı hal lazeri kullanılmıştır. Kullanılan lazerin gücü 4 kW, kaynak hızı 2 m/s, odak mesafesi 1-1.2 m ve 106 W/cm² enerji seviyesinde kaynak gerçekleştirilmiştir. Çekme deneylerinde ana metale göre; direnç nokta kaynaklı numunelerde %29, uzaktan lazer kaynaklı numunelerde %33 mukavemet kaybı gözlemlenmiştir. Sertlik deney sonuçları incelendiğinde, esas malzemede sertlik değeri düşük iken, kaynak metalinde ve ısıdan etkilenen bölgede hızlı soğumalar sonucu oluşan yapılardan dolayı esas metalden daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Her iki yöntemin de benzer yorulma davranışı gösterdiği gözlemlenmiştir [22]. Lazer kaynak işleminde mikro yapı ve özellikleri etkileyen önemli parametrelerden biri de enerji girişi olarak tespit edilmiştir. Wang ve diğerleri DP1000 soğuk haddelenmiş 1.5 mm kalınlığında malzemenin lazer kaynağıyla birleştirilmesinde enerji girişinin mikro yapı ve özelliklere etkisini araştırmışlardır. Enerji girişi olarak 5 farklı parametre kullanılmıştır ve enerji girişlerine göre kaynak yapıları Şekil 3'te gösterilmiştir. Kaynaklı malzemenin dayanımının ana metale göre %86-91 düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca deney numunelerinde sünekliğinde önemli ölçüde azaldığı ve uzamanın da tek eksenli çekme deneyinde %60 dan fazla azaldığı tespit edilmiştir. Enerji girişi azaldığında kaynaklı bölgenin tane yapısının iri taneli bir hal aldığı ve bu durumda mekanik özellikleri düşürdüğü belirlenmiştir. DP1000 sac malzemenin lazer kaynağı ile birleştirilmesinde mekanik özelliklerin en ideal enerji girişi 130 J/mm seviyesinde olduğu tespit edilmiştir [23].



Şekil 3: DP1000 sac malzemenin farklı türdeki enerji girişleri ile birleştirilme uygulamaları; a) 325 J/mm, b) 217 J/mm, c) 163 J/mm d) 130 J/mm, e) 108 J/mm, f) 93 J/mm [23]

2.2. Dönüşüm Katkılı Plastisite Gösteren (TRIP) Çeliklerin Lazer Kaynağı Uygulamaları

Otomotiv endüstrisindeki uygulamalar için yüksek dayanım-uzama kombinasyonu sağlayan TRIP çelikleri son zamanlarda araştırmacıların büyük ilgisini çekmektedir. TRIP çelikleri temelde farklı bir yüksek dayanım çelik türü olup tipik kimyasal kompozisyonları % ağırlıkça Fe, 0.2C, 1.7Mn, 1.5Si içermektedir [24-32]. TRIP çeliklerinin mikroyapısını; ferrit, beyrit ve kalıntı ostenit oluşturmaktadır. Artan dayanım ve süneklik, mekanik yüklem altında martenzit fazının oluşumu ile elde edilmektedir [24,33]. Şekil 4'te TRIP çeliklerinin mikroyapısı verilmiştir. TRIP çeliklerinin lazer kaynak uygulamaları da bu bölümde verilmiştir.



Şekil 4: TRIP çeliklerinin iç yapısı [19]

Sharma ve Molian; TRIP780, yumuşak çelik (YÇ) ve DP980 çeliklerini lazer kaynağı ile birleştirerek mikro yapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, TRIP çeliği ön gerilme uygulanmış ve ön gerilme uygulanmamış olarak iki farklı şekilde kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan farklı tür çelik kombinasyonları; DP-TRIP, YÇ-TRIP olarak ikiye ayrılmıştır. Birleştirmede kullanılan Nd:YAG katı hal lazer kaynak parametreleri; lazer gücü 2 kW, kaynak hızı 70 mm/s, odak nokta çapı 0.6 mm, koruyucu argon gazı akış oranı; 30 l/min olarak belirlenmiştir. Malzemelerin kalınlıkları ise TRIP 1 mm, DP 1.5 mm, YÇ 1 mm seçilmiştir. Yapılan kaynak işlemleri sonucunda ergime bölgesinde herhangi bir çatlak, boşluk, gözenek gibi kusurlara rastlanmamıştır. TRIP-DP birleşmesinde ergime bölgesi sertliği, TRIP-YÇ birleşmesine göre daha fazla gözlemlenmiştir. DP980 tarafındaki ısıdan etkilenen bölgede yumuşamalar gözlenmiş olup bu yumuşamaların çekme testine herhangi bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Çekme testlerinde en büyük uzama YÇ den dolayı TRIP-YÇ birleşmesinde gözlemlenirken TRIP-DP birleşmesinde de TRIP kısmında hatırı sayılır bir uzama gözlenmiştir. TRIP-YÇ birleşmesinde mükemmel bir şekillenebilirlik elde edilirken TRIP-DP birleşmesinde şekillenebilirlik daha düşük elde edilmiştir. Ayrıca TRIP-YÇ birleşimi iyi bir yorulma dayanımı göstermiştir [34]. TRIP çeliklerinin lazer kaynağıyla birleştirilmesini içeren bir diğer çalışmada, Lun ve diğerleri yapısında orta seviyede Mn bulduran TRIP çeliklerinin DP980 ve HSLA malzemeleriyle fiber lazer kaynağıyla birleştirilmeleri sonucu malzemedeki mikro yapı ve mekanik özelliklerindeki değişimi araştırmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları sac malzeme kombinasyonları ve lazer kaynağıyla birleştirilmiş malzemelerde kopmanın hangi tarafta gerçekleştiği Şekil 5'te verilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan TRIP çeliği galvaniz kaplı ve 1.46 mm kalınlığında, DP VE HSLA ise galvaniz kaplı 1.2 mm kalınlığındadır. Fiber lazer kaynak parametreleri ise; lazer gücü 4 kW, kaynak hızı 12 m/min, odak mesafesi 300 mm olarak seçilmiştir. TRIP-TRIP kaynaklı numunelerde ergime bölgesinin martenzit ve biraz da ostenit barındırdığı tespit edilmiştir. HSLA ve DP ergime bölgesinin de benzer sertlikte martenzit barındırdığı tespit edilmiştir. TRIP-TRIP birleşimi ana metal ile karşılaştırıldığında ise kaynaklı yapıda %4 mukavemet kaybı olduğu görülmüştür. Ayrıca mikroyapıda TRIP-TRIP birleşiminin martenzit dönüşümünü engellemesinden dolayı ikinci bir akma noktası gözlemlenmiştir. TRIP-TRIP birleşiminin şekillenebilirliği iki eksenli gerilim

yüklemeye koşullarına bağlı kaldığında ergime bölgesinin kırılma yapısı tarafından ciddi bir şekilde sınırlandırılmıştır. TRIP-HSLA ve TRIP-DP birleşiminin sünek şekillenmesi daha güçsüz olan çelik tarafına doğru önemli bir gelişim gösterdiği tespit edilmiştir [35].



Şekil 5: Ana metalde ve kaynaklı birleştirmede çekme kopması [35]

Bir başka çalışmada Odabaşı ve diğerleri 1.5 mm kalınlığa sahip galvanizli TRIP800 çeliğinin lazer kaynağı ile kaynatılmasında ısı girdisinin mikroyapıya ve şekillendirilebilirliğe etkisini incelemiştir. Çalışmada 70, 80, 100, 130 J/mm'lik ısı girdileri kullanılmıştır. Ayrıca şekillendirilebilirliği gözlemek ve test etmek için Erichsen çökertme testleri yapılmıştır. TRIP800 malzeme için lazer kaynak parametreleri Tablo 2'de verilmiştir [36].

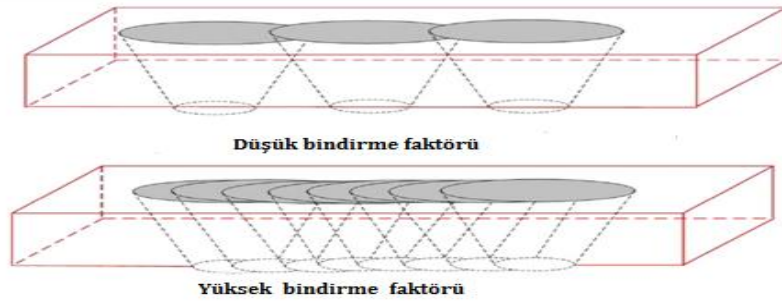
Tablo 2. TRIP800 malzeme için lazer kaynak parametreleri [36]

Numune No	Lazer gücü (W)	Kaynak hızı (mm/s)	Isı girdisi (J/mm)
1	2900	41.42	70
2	2500	31.25	80
3	2000	20	100
4	1500	11.53	130

Yapılan deneysel çalışmada kaynaklı bölge mikroyapısının martenzitik olduğu ve bu yapının kaynakta uygulanan ısı girdilerinden önemli ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir. Bu etkilenmenin bir yansıması olarak Erichsen testlerinde kaynak işleminde düşük ısı girdisi kullanılan numunelerin şekillendirilebilirlikleri düşük değerler gösterdiği, yüksek ısı girdileri kullanımında ise yüksek şekil değiştirilebilirlik gösterdiği tespit edilmiştir [36].

2.3. Titanyum Alaşımlarının Lazer Kaynağı Uygulamaları

Fiziksel ve kimyasal açıdan üstün özellikler gösteren titanyum malzemeler, çelik ve kobalt alaşımlı malzemelere göre daha hafif malzemelerdir. Titanyum malzemenin özgül ağırlığı 4.51 gr/cm³ ve ergime sıcaklığı 1680°C olup mikro yapısı oda sıcaklığında sıkı dizilmiş hegzagonal kafes yapısına sahiptir. Yüzeyinde oksitlenmeyi önleyen ve korozyon etkili kimyasal maddelerle reaksiyona girmeyi engelleyen bir oksit tabakası oluşturması sayesinde titanyum malzemeler korozif etkilere karşı dirençli malzemeler olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde Titanyum ve alaşımları; protez eklem, cerrahi splint, damar stentler ve bağlayıcıları, dental implant, kuron köprü ve parsiyel protez yapımında sıklıkla kullanılmaktadırlar [37,38]. Bir Ti malzeme alaşımı olan Ti6Al4V son zamanlarda özellikle yakıt tanklarında ve kanser radyoterapilerinde kullanılan titanyum kapsüllerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Gao ve diğerleri Ti6Al4V sac malzemenin Nd:YAG katı hal lazer kaynağı kullanılarak yapılan kaynak işleminde mikroyapı ve mekanik özelliklere bindirme faktörünün etkisini incelemiştir. Bindirme faktörü, kaynak dikişinin sıklığını ifade eden bir kavram olup Şekil 6'da gösterilmiştir [39].

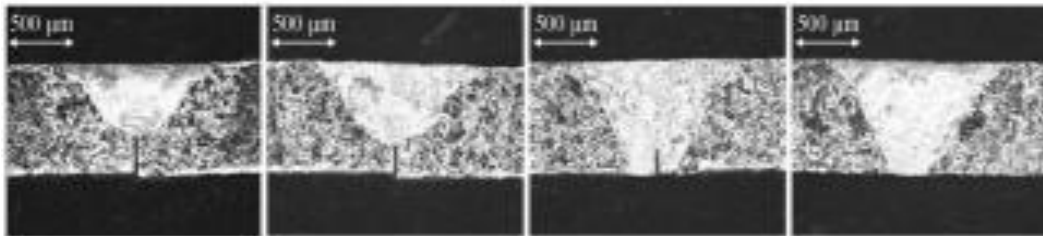


Şekil 6: Düşük ve yüksek bindirme faktörünün şematik gösterimi [39]

Çalışmada 0.8 mm kalınlığındaki Ti6Al4V malzemenin darbeli Nd:YAG katı hal lazer kaynağı ile kaynatılmasında TC-1 dolgu teli kullanılmıştır. Lazer kaynak parametreleri; darbe enerjisi 9.5 J, darbe süresi 5.5 ms, darbe frekansı 20 Hz, odak pozisyonu -2 mm ve kaynak hızı 200-1000 mm/s olarak belirlenmiştir. Çekme ve yorulma deneylerinde orta seviyedeki bindirme faktörü kullanılarak yapılan deneylerde düşük veya yüksek bindirme faktörü ile yapılan deneylere göre daha iyi mekanik özellikler gösterdiği gözlemlenmiştir [39]. Darbeli lazer kaynak teknolojisi, üzerinde oksit tutan malzemelerin üzerindeki oksiti yakmak için geliştirilmiş bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Ascari ve diğerleri yaptıkları çalışmada lazer kaynağında maksimum darbe gücü, darbe süresi ve darbe frekansı parametrelerinin; kaynak dikişi nüfuz derinliği, genişliği ve genel şekil bilgisine etkisini statik analiz ve optik gözlemlerle araştırmışlardır. Deneyde 0.7 mm kalınlığında Ti Grade 1 (ASTM 265-13a) plaka kullanılmıştır. Kaynak parametreleri Tablo 3'te verilmiştir. Çalışma sonucunda kaynak nüfuz derinliği ve genişliği için en önemli parametrenin maksimum darbe gücü olduğu anlaşılmıştır. Darbe süresinin etkisinin maksimum darbe gücü kadar olmadığı ama %20 kadar bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Darbe frekansının ise her iki durum için önemli bir parametre olmadığı gözlemlenmiştir. Doğru kaynak dikişini yakalayabilmek için maksimum darbe gücünün düşük tutulması gerektiği ve doğru nüfuz derinliğini yakalayabilmek için, Şekil 7'de görüldüğü gibi ortalama olarak yüksek darbe sürelerine ulaşmak gerektiği belirlenmiştir [40].

Tablo 3. Ti Grade 1 için darbeli lazer kaynak parametreleri [40]

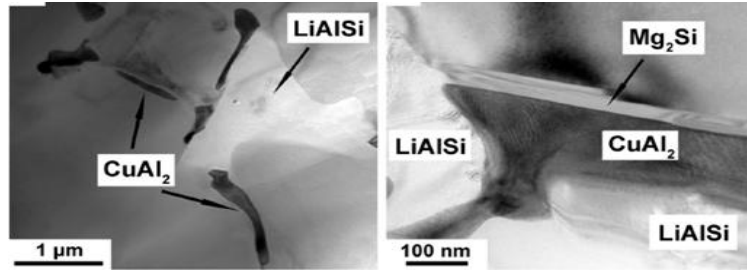
Lazer değişkenleri	Değerler
Maksimum darbe gücü	0-1000 W
Darbe süresi	0.3-25 ms
Darbe enerjisi	0-100 j
Darbe frekansı	0.5-300 Hz
Nokta çapı	0.6-2 mmm
Kaynak hızı	0-20 mm/s



Şekil 7: Darbe sürelerinin (Pd) kaynak nüfuziyet derinliğine etkisi : (a) Pd:15ms , (b) 21 ms , (c) 23 ms , (d) 25 ms [40]

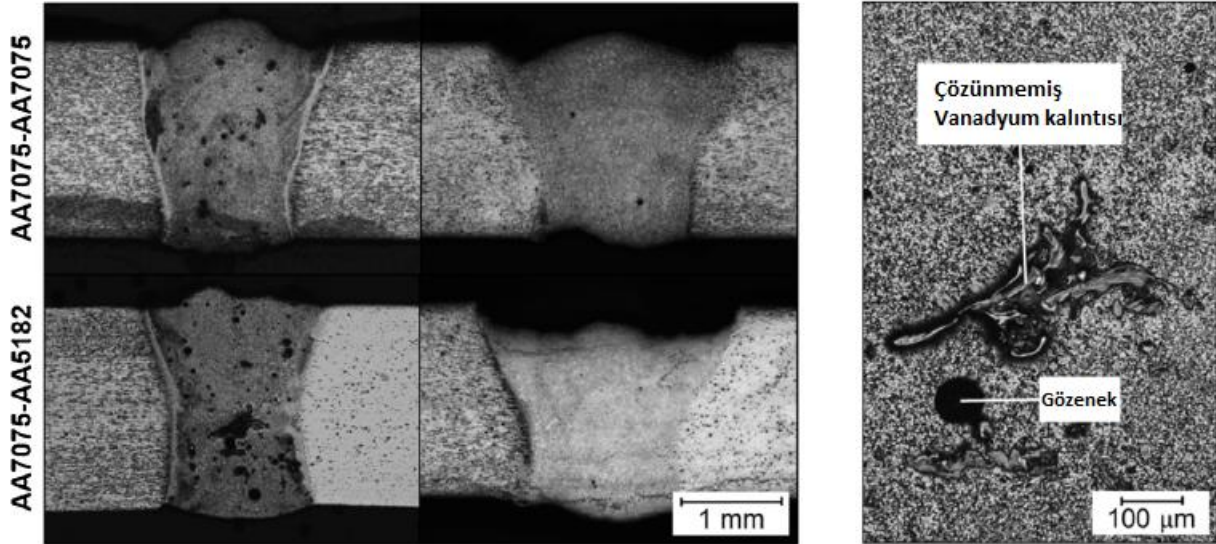
2.4. Alüminyum Alaşımlarının Lazer Kaynağı Uygulamaları

Alüminyum kullanımı endüstride demir ve çelikten sonra ikinci sırayı almakta olup, alüminyumun üretim miktarı 1900'li yıllardan 1980'li yıllara kadar büyük bir artış göstermiştir. Alüminyum alaşımları düşük yoğunlukları, yüksek ısı ve elektrik iletkenleri, korozyon özelliklerinin iyi olmasının yanı sıra kolay eritilebilmesi ve dökülebilmeleri özellikleri nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada öne çıkmaktadır [41,42]. Günümüzde modern uçak endüstrisinde; yapısal tasarım ve imalatta, ağırlığı azaltmak ve performansı arttırmak oldukça önemli bir durumdur. Havacılık uygulamalarında Al-Li alaşımları hafiflik açısından oldukça uygun malzemelerdir. Al-Li alaşımı olan AA2060 malzemenin de havacılık sektöründe tercih edilmeye başlamasıyla birlikte lazer kaynağı uygulamaları da araştırılmaya başlanmıştır. Zhang ve diğerleri 2mm kalınlığındaki AA2060 malzemeyi AlSi12 dolgu teli kullanarak lazer ışın kaynağıyla birleştirme sonucu malzemedeki mikroyapı ve mekanik özelliklerin değişimini deneysel araştırmışlardır. Fiber lazer kaynağı kullanılarak yapılan çalışmada kaynak parametreleri; lazer gücü 4 kW, kaynak hızı 3 m/dk odak uzaklığı 250 mm, odak çapı 0.25 mm, dolgu teli çapı 1.2 mm, dolgu teli hızı 4 m/min olarak belirlenmiştir. Kaynak sonunda birleştirilmiş malzemenin dayanımının ana metale göre %80 daha dayanıklı olduğu saptanmıştır. Tüm enine çekme deneylerinde, kırılmanın taneler arası kırılma şeklinde ve ergime bölgesinde gerçekleştiği saptanmıştır. Kırılmanın ergime bölgesinden ana metale doğru gevrek kırılmadan sünek kırılmaya doğru bir hal aldığı tespit edilmiştir. Ayrıca; çökme sertleşmesinin kaybolmasından dolayı, ergime bölgesinde dayanım ve sertlik azalmış ve dayanım ile sertlik azalmasının ısıdan etkilenen bölgeden ana metale doğru kademe kademe artış gösterdiği belirlenmiştir. Ergime bölgesinin mikroyapısı Şekil 8'de verilmiştir [43].



Şekil 8: AA2060 malzemenin lazer kaynağında ergime bölgesi iç yapısı, (a) 1µm ölçekte, (b) 100 nm ölçekte [43]

Alüminyum malzemenin diğer elementlerle oluşturduğu alaşım türlerinden birisi olan Al-Zn-Mg-Cu alaşımları, çeliklere göre oldukça hafif olmasına rağmen otomotiv endüstrisinde bu alaşımların içeriğinde %10'dan fazla (Zn+Mg+Cu) bulundurmasından dolayı ve ergitme kaynak yöntemlerinde problemlerin yaşanması nedenlerinden dolayı bu alaşımların uygulamaları şu ana kadar yeterince kabul görmemektedir. Buna karşın Al-Mg alaşımlarının kaynak kabiliyeti oldukça iyi olarak öne çıkmaktadır. Enz ve diğerleri alaşımlardaki bu problemi aşabilmek için 2 mm kalınlığında Al-Zn-Mg-Cu alaşımı olan AA7075 ve yine 2mm kalınlığında Al-Mg alaşımı olan AA5182 malzemelerini AA7075-AA7075 ve AA7075-AA5182 kombinasyonu ile iki yaklaşım türeterek kaynak edilebilirliğini araştırmışlardır. Bu yaklaşımlardan ilki, ilave malzeme olarak çok ince bir vanadyum levha kullanılmasıyla ikinci yaklaşım olarak geniş bir ışın demeti çapıyla fiber lazeri kullanılmasını belirlemiştir. Kaynak sonrası içyapı Şekil 9'da verilirken, kaynak parametreleri ise Tablo 4'te verilmiştir [44].



Şekil 9: AA7075-AA5182 malzemelerinde lazer kaynağı yaklaşımları, (a) Birinci yaklaşımla yapılan deneyin iç yapısı, (b) ikinci yaklaşımla yapılan deneyin iç yapısı, (c) birinci yaklaşımda olan ergime bölgesindeki vanadyum kalıntısı [44]

Tablo 4. AA7075-AA5182 malzemelerin lazer kaynağı için kaynak parametreleri [44]

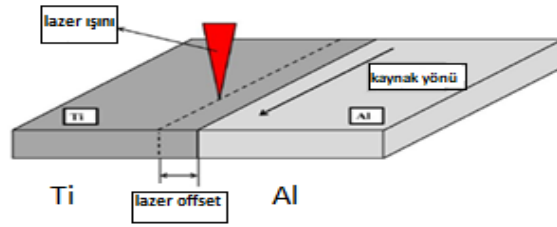
	1. Yaklaşım	2. Yaklaşım
Lazer tipi	YAG Lazer	Fiber lazer
Lazer gücü (kW)	2	3
Kaynak hızı (mm/min)	3500	3500
Dolgu teli akış oranı (mm/min)	3000	-
Koruyucu gaz akış oranı (l/min)	20	20
Odak uzunluğu (mm)	250	300

Yapılan araştırmalar sonucunda her iki yaklaşımın da farklı kimyasal ve mikroyapısal özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. İlk yaklaşımda, vanadyum ilave edilmesine rağmen lokal bir mikrosertlik artışı gözlemlenmiştir. İlk yaklaşımda homojen bir yapı oluşmamasından dolayı çekme ve şekillendirme özelliği ikinci yaklaşımla kıyaslandığında kalitesiz olarak elde edilmiştir. Farklı malzemelerin birleştirilmesinde mekanik özelliklerin farklılığından ötürü mekanik uyumsuzluk da tespit edilmiştir. Her iki yaklaşımda da kaynak kesintilerinin azaldığı ve kaynağın dış taraftaki görüşünün geliştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca yine her iki yaklaşımda da kaynak kalitesinde gelişme gözlenirken kaynak görünümü, gözenek ve kırılma açısından aynı gelişme gözlemlenmemiştir. Kaynaklanmış malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek için kaynak sonrası ısıtılma işlemi, yüzey işleme ve ılık şekillendirme gibi yöntemler önerilmiş olmasına rağmen bu uygulamaların hem maliyetli hem de büyük ölçekli yapılar için sınırlı olacağı belirlenmiştir [44].

2.5. Farklı Özellikteki Malzemelerin Lazer Kaynağı Uygulamaları

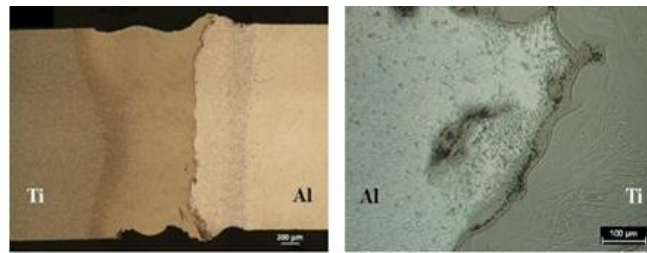
Taşımacılık endüstrisinde hafiflik ve dayanım birlikte olması arzulanan unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Alüminyum alaşımları hafiflik özelliği ile öne çıkarken çelik malzemeler de dayanım özelliği ile ön plana çıkmaktadır. Bu iki malzemeyi beraber kullanabilmek taşımacılık endüstrisinde birçok problemi ortadan kaldırabilecek bir çözüm olarak görülmektedir. Bu iki malzemeyi birleştirmek, metalurjik uyumsuzluktan dolayı konvansiyonel kaynak yöntemleriyle pek mümkün olamamaktadır. David yaptığı araştırmada Alüminyum 6082 ile galvaniz kaplı DP600 çeliği birleştirmek için lazer nüfuziyet kaynağı ve iletim lazer kaynağı olmak üzere iki farklı yöntem

kullanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada 1.2 mm kalınlığında sac malzemeler kullanılmış, alüminyum üstte çelik altta ve çelik üstte alüminyum altta olarak bindirme kaynağı yapılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, nüfuziyet yöntemiyle yapılan kaynak sonucu birleştirilmiş malzemenin kayma mukavemetinin 190 MPa olduğu tespit edilmiştir. Bu değer Alüminyum ana metalinin %60'ına, DP ana metalinin %30'una eşdeğer olduğu belirlenmiştir. Ayrıca nüfuziyet yönteminde çinkonun iki metali tutturmada önemli bir rol oynadığı da gözlenmiştir. İletim yönteminde ise kayma mukavemeti 140 MPa olarak ölçülmüştür. Bu yöntemde ısı derecesinin düşük olması da önemli bir avantaj olarak görülmüştür [45]. Lazer kaynağı kullanılarak titanyum ve alüminyum malzemelerin de kaynak edilebilirliği deneysel araştırılmıştır. Ancak Ti-Al yapılarının birleşimi havacılık ve otomotiv sektöründe harika bir potansiyel olmasına rağmen metal özelliklerindeki farklılıklar, ergiyik fazda malzemelerin birbirine karışması ve gevrek bir yapı ortaya çıkması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Casalino ve diğerleri 2 mm kalınlığındaki Ti6Al4V ve AA6061 malzemeleri fiber lazer kaynağıyla birleştirerek mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Lazer kaynak parametreleri olarak; lazer gücü 1550 W, kaynak hızı 2.5 m/min, odak mesafesi 1 mm ve öteleme mesafesinde 0.3 mm olarak belirlenmiştir. Yapılan kaynak şeklinin görünümü Şekil 10'da verilmiştir [46].



Şekil 10: Titanyum ve alüminyum malzemelerin lazer kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi işlemi[46]

Deneysel çalışmada; lazer ışını, kaynağın Ti tarafına gönderilmiş ve Al tarafına ise malzeme sıvı hale geçip karıştırma olmadan ısı aktarılmıştır. Böylelikle kaynak merkez eksenini boyunca ince ve düzenli bir ara yüzey oluşturulurken Al tarafında da gözenek oluşumunun önlendiği tespit edilmiştir. Titanyum ve alüminyum alaşımlarının lazer kaynağıyla birleştirilmeleri sonucu oluşan enine kesit ve iki metalli ara yüzey resimleri Şekil 11'de verilmiştir [46].



Şekil 11: Al-Ti lazer kaynağı, (a) Enine kesit, (b) iki metalli ara yüzey [46]

Al-Ti malzemelerin lazerle birleştirilmesinde Ti tarafındaki ergime bölgesinde martenzit dönüşümü görülürken, Al tarafında ise çökeltme sertleşmesi görülmüştür. İki metal arasında ultra ince dayanıklı bir tabaka oluşumu gözlemlenmiştir. Çekme deneyinde ise kopma işlemi Al tarafına yakın ergime bölgesinde gerçekleşmiştir. Toplam uzama ise sadece AA6061 malzemesinin uzamasından daha düşük gözlenmiştir [46].

3. Sonuçlar

Lazer kaynağı üstün özellikleriyle son yıllarda özellikle değişik türlerdeki ve kalınlıktaki malzemelerin başarılı bir şekilde kaynak edilmesinden dolayı çok sayıda sektörde önem

kazanmıştır. Bu çalışmada, çeşitli sektörde yaygın kullanılan malzemelerin lazer kaynağı ile birleştirilmesine yönelik çalışmalar ve elde edilen sonuçlar derlenmiştir. Derlenen çalışmalarda tüm malzemelerde lazer kaynağı ile birleştirme sonucunda erime bölgesinde martenzit dönüşümünden kaynaklı sert bir yapı oluşurken ısıdan etkilenen bölgede erime bölgesine nazaran daha yumuşak bir yapı olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bazı sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Farklı türdeki DP sacların birleştirilmesi sonucunda akma sınırı ve pekleşme hızının yüksek mukavemetli ve düşük mukavemetli sac malzemeler arasında bir değer olduğu belirlenmiştir. DP sacların lazer kaynağında enerji girişinin azalması durumunda kaynaklı bölgenin yapısının daha iri taneli hale geldiği ve bu durumda mekanik özellikleri olumsuz etkilediği belirlenmiştir. TRIP-DP-YÇ sac türlerinin kaynaklı birleştirilmelerinde süneklik oluşumunun düşük dayanımlı olan malzeme tarafında daha yüksek miktarda olduğu gözlemlenmiştir. TRIP-HSLA-DP kaynaklı birleşiminin sünek şekillenmesi daha güçsüz olan çelik tarafına doğru önemli bir gelişim gösterdiği tespit edilmiştir. Ti alaşımı malzemenin çekme ve yorulma deneyleri sonucunda lazer kaynağında orta seviyedeki bindirme faktörünün düşük ve yüksek bindirme faktörüne göre oldukça iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Darbeli lazer kaynağında, kaynak dikişi nüfuz derinliği ve genişliğini etkileyen en önemli parametrenin maksimum darbe gücü olduğu belirlenmiştir. Darbeli lazer kaynağında doğru kaynak dikişini yakalayabilmek için maksimum darbe gücünün düşük tutulması gerekirken doğru nüfuz derinliğini yakalayabilmek için de yüksek darbe sürelerine ulaşması gerektiği tespit edilmiştir. Al alaşımlarının lazer kaynağıyla birleştirilmesiyle tüm enine çekme deneylerinde, kırılmanın taneler arası kırılma şeklinde ve ergime bölgesinde gerçekleştiği saptanmıştır. Kırılmanın ergime bölgesinden ana metale doğru gevrek kırılmadan sünek kırılmaya doğru bir hal aldığı tespit edilmiştir.

Konvansiyonel kaynak yöntemleriyle gerçekleştirilemeyen farklı malzemelerin kaynakla birleştirilme işleminin lazer kaynağıyla başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Alüminyum alaşımı ve galvaniz kaplı DP çelik lazer nüfuziyet kaynağında DP çelik yapısında bulunan çinkonun iki metali tutturmada önemli rol oynadığı belirlenmiştir. Ti-Al alaşımlarının lazer kaynağı uygulamalarında Al alaşımlarında gözenek oluşumunu engellemek için lazer ışını Ti tarafına gönderilip sıvı fazda bir karıştırma olmadan Al tarafına ısı aktarılması suretiyle yeni bir yöntem geliştirilmiştir.

4. Kaynaklar

- [1] Püskülcü G, Koçlular F., “Lazer Kaynak Yöntem ve Uygulamaları”, Mühendis ve Makina, 2009, 50(599):8-17.
- [2] Özden H, Gürsel K., “Gemi İnşaatı ve Deniz Yapılarında Lazer Işın İmalat Yöntemlerinin Uygulanması”, Gemi Mühendisliği ve Sanayimiz Sempozyumu, İstanbul, 240-251, 2004
- [3] Dahotre NB, Harimkar SP, “Laser welding”, “Laser Fabrication and Machining of Materials”, Springer Science, ABD, 2008.
- [4] O’Brien RL, “Jefferson’s Welding Encyclopedia”, 18th Edition, American Welding Society, ABD, 1997.
- [5] Timings R, “Fabrication and Welding Engineering”, Newnes, Oxford, İngiltere, 2008.
- [6] Jokinen T, “Novel ways of using Nd: YAG laser for welding thick section austenitic stainless steel” PhD Thesis, Lappeenranta University of Technology, 2004.
- [7] Rykalin N, Uglov A, Kokora A, “Laser machining and welding”, Mir Publishers, Moscow, Russia, 1978.
- [8] Çelen S, “Paslanmaz çeliklerin lazer kaynağında kaynak parametrelerinin bağlantının dayanım ve korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2006.
- [9] Katayama S, “Laser welding of aluminium alloys and dissimilar metals”, Welding International, 2004, 18(8):618-625.

- [10] Yamashita Y, Kawano T, Mann K, "Underwater Laser Welding by 4 kW CW YAG Laser", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2001, 38(10), 891-895.
- [11] Iqbal S, Gualini MMS, Grassi F, "Laser welding of zinc-coated steel with tandem beams: Analysis and comparison", *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 184(1-3): 12-18.
- [12] Gladkov EA, Maloletkov AV, Perkovsky RA, "Automated system for investigation laser welding process", *Welding International*, 2003, 17(6):476-481.
- [13] Kamimuki K, Inoue T, Yasuda K, Muro M, Nakabayashi T, Matsunawa A, "Behaviour of monitoring signals during detection of welding defects in YAG laser welding. Study of monitoring technology for YAG laser welding (Report 2)", *Welding International*, 2003, 17(3):203-210.
- [14] Haboudou A, Peyre P, Vannes AB, Peix G, "Reduction of porosity content generated during Nd: YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys", *Materials Science and Engineering*, 2003, 363(1-2):40-52.
- [15] Şen M, Yıldırım E, Çebi H, Özdemir C. "Çift Fazlı Çeliklerden Üretilen Otomotiv Sac Parçalarının Dizaynında Geri Esnemeyi Optimize Edebilmek İçin Sac Kalınlığına Bağlı Olarak Büküm Radyüslerinin Belirlenmesi", *Electronic Journal of Machine Technologies*, , 2015, 12(2):75-95.
- [16] Boldavin H, Tekin E. "Çift Fazlı İyapı Oluşturma İşleminin Yapı Çeliklerine Etkileri", 4. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, Türkiye, 1991.
- [17] Wang W, Wei X. "The effect of martensite volume and distribution on shear fracture propagation of 600-1000 Mpa dual phase sheet steels in the process of deep drawing", *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, 67(1):100-107.
- [18] Ozturk F, Toros S. "Tensile and spring-back behavior of DP600 advanced high strength steel at warm temperatures", *Journal of Iron and Steel Research International*, 2009, 16(6):41-46.
- [19] International Iron & Steel Institute Committee on Automotive Applications. "Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines", 2005.
- [20] Farabi N, Chen DL, Zhou Y. "Microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar DP600/DP980 dual-phase steel joints", *Journal of Alloys and Compounds*, , 2011, 509(3):982-989.
- [21] Dong D, Liu Y, Yang Y, Li J, Ma M, Jiang T, "Microstructure and dynamic tensile behavior of DP600 dual phase steel joint by laser welding", *Materials Science & Engineering A*, 2013, 594:17-25.
- [22] Aydemir B, Aydemir E, Kaluç E, "DP1000 Çelik Sacların Uzaktan Lazer (RLW) ve Direnç Nokta Kaynaklı (RSW) Birleştirmelerinin Çekme ve Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi", *Mühendis ve Makina*, 2017, 58(687):17-28.
- [23] Wang J, Yang L, Sun M, Liu T, Li H, "Effect of energy input on the microstructure and properties of butt joints in DP1000 steel laser welding", *Materials and Design*, 2015, 90: 642-649, .
- [24] Özer A, "Çeliklere uygulanan TRIP işlemi ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi", *Tübvav Bilim Dergisi*, 2009, 2(3):291-301.
- [25] Zrník J, Stejskal O, Nový Z, Hornák P. "Relationship of Microstructure and Mechanical Properties of TRIP Aided Steel Processed by Press Forging", *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 192-193, 367-372.
- [26] Fahr D. "The Enhancement of Ductility in High Strength Steels", PhD Thesis, Lawrence Radiation Laboratory University of California, 1969.
- [27] Itami A, Takahashi M, Ushioda K. "Cold-rolled High-Strength TRIP Sheet Steels and Plastic Stability of Their Retained Austenite", *Proceedings of the Symposium on High-Strength Sheet Steels for Automotive Industry*, Baltimore, 16-19 October 1994.
- [28] Sugimoto K, Kobayashi M, Yasuki S, Hashimoto S. "Influence of Deformation Temperature on the Bauschinger Effect of TRIP-aided Dual Phase Steel", *Materials Transactions*, , 1994, 36(5):632-638.

- [29] Gerberich WW, Hemmings PL, Merz MD, Zackay FV. “Preliminary Toughness Result on TRIP Steel”, *Materials Transactions*, 1968.
- [30] Wu D, Li Z. “Effect of Thermo-mechanical Controlled Processing on the Microstructure and Mechanical Properties of Fe-C-Mn-Si Multiphase Steels”, *ISIJ International*, 2006 46(7):1059-1066.
- [31] Meyer MD, Vanderschueren D, Cooman BCD. “The Influence of the Substitution of Si-by Al on the Properties of Cold Rolled C-Mn-Si TRIP Steels”, *ISIJ International*, 1999, 39(8): 813-822.
- [32] Hojo T, Sugimoto K, Mukai Y, Ikeda S, “Effects of Aluminum on Delayed Fracture Properties of Ultra High Strength Low-alloy TRIP-aided Steels”, *ISIJ International*, 2008 48(6):824-829.
- [33] Airod A, Petrov R, Colas R, Haubaert Y. “Analysis of the TRIP Effect by Means of Axisymmetric Compressive Tests on a Si-Mn Bearing Steel”, *ISIJ International*, 2004, 44(1):179-186.
- [34] Sharma RS, Molian P. “Yb:YAG laser welding of TRIP780 steel with dual phase and mild steels for use in tailor welded blanks”, *Materials and Design*, 2009, 30(10):4146-4155.
- [35] Lun N, Saha D C, Macwan A, Pan H, Wang L, Goodwin F, Zhou Y. “Microstructure and mechanical properties of fibre laser welded medium manganese TRIP steel”, *Material and Design*, 2017, 131:450-459.
- [36] Odabaşı A, Eruslu MN. “Lazer kaynaklı TRIP çeliğinin şekillendirilebilirliği”, *Metal Dünyası*, 2016, 23(263):74-80.
- [37] Çağlayan ME. “Alanin–Alanin Sodyum Tuzu Ortamında Ti Bazlı Ti Alaşımlarının Hidroksiapatit İle Kaplanması Ve Kaplamanın Bazı Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, 2016.
- [38] Pasinli A. “Biyomedikal Uygulamalarda Kullanılan Biyomalzemeler”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2004, 4: 25-34.
- [39] Gao X, Liu J, Zhang L, Zhang J. “Effect of the overlapping factor on the microstructure and mechanical properties of pulsed Nd: YAG laser welded Ti6Al4V sheets”, *Materials Characterization*, 2014, 93:136-149.
- [40] Ascari A, Fortunato A, Guerrini G, Liverani E, Lutey A. “Long pulse laser micro welding of commercially Pure Titanium Thin Sheets”, *Procedia Engineering*, 2017, 184:274- 283.
- [41] Ertürk SÖ. “Al Alaşımlarının Basınçlı Dökümünde Yolluk Sisteminden Kaynaklanan Gaz Problemlerinin Simülasyon Tekniği İle İncelenmesi.” Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2010.
- [42] Erdoğan M. “Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri”, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, Türkiye, 2000.
- [43] Zhang X, Huang T, Yang W, Xiao R, Liu Z, Li L. “Microstructure and mechanical properties of laser beam-welded AA2060 Al-Li alloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 237:301-308.
- [44] Enz J, Kumar M, Riekehr S, Ventzke V, Huber N, Kashaev N. “Mechanical properties of laser beam welded similar and dissimilar aluminum alloys”, *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 29:272-280.
- [45] Koudri-David A. “Study of metallurgic and mechanical properties of laser welded heterogeneous joints between DP600 galvanised steel and aluminium 6082”, *Materials and Design*, 2013, 54:184-195.
- [46] Casalino G, D’ostuni S, Guglielmi P, Leo P, Mortello M, Palumbo G, Piccininni A. “Mechanical and microstructure analysis of AA6061 and Ti6Al4V fiber laser butt weld”, *Optik Optics*, 2017, 148:151-156.