

SAÇ MALZEMELERİN LAZER KAYNAK PARAMETRELERİ

¹Muciz ÖZCAN, ²Necmettin TARAKCIOĞLU, ³Şirzat KAHRAMANLI

¹Selçuk Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Konya

²Selçuk Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü, Konya

³Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği
Bölümü, Konya

ozcan@selcuk.edu.tr, ntarakcioglu@selcuk.edu.tr, sirzat_k@selcuk.edu.tr

Özet

Metal saçların lazerle kaynak edilmesi, diğer kaynak yöntemlerine nazaran; dar kaynak bölgesi, hassas sıcaklıkta derinlik kontrolü ile ısıtma ve farklı tip metallerin kaynatılabilmesi gibi bir çok imkanlar sağlamaktadır. Eğer saç malzemeleri kaynak etmek için önemli olan parametreler tespit edilir ve bunlar optimum değerlere ayarlanırsa kaynak işlemi başarı ile gerçekleştirilebilir. Söz konusu parametreler ve/veya onların değerleri yanlış seçilecek olursa malzemelerin kaynatılması yerine delinmesi, kesilmesi, markalanması gibi durumlar ile karşılaşılabilir. Kaynak işlemi, lazer ışın demetini malzeme üzerinde belli bir hızla gezdirilme yolu ile gerçekleştirildiği için, kolaylıkla otomasyona tabi tutulabilir. Bu çalışmada saç malzemelerin Nd:YAG lazerle kaynak edilmesi için gereken parametrelerin belirlenmesi ele alınmaktadır.

Anahtar kelimeler: Lazer kaynağı, Lazer kaynağı parametreleri, güç yoğunluğu, saç metaller

THE PARAMATERS OF LASER WELDING FOR SHEET METALS

Abstract

The laser welding in comparison to other welding methods of sheet metals, has some advantages such as narrowly heat affected zone, heating with depth control at desired temperature and welding of different types of metals, etc.

If the required parameters for welding of sheet metals are defined well and these are adjusted to optimum values the welding process can be performed successfully. If the mentioned parameters and their values are selected wrongly, it can cause drilling of metals instead of welding. Since the laser welding process is performed via laser beam moving on the work-piece at constant speed, it can be automated easily.

In this study, in order to welding sheet metals using Nd:YAG laser the required parameter and their values have been identified.

Key Words: Laser welding, Laser welding parameter, Irridance, Sheet metals

1. Lazer Kaynağının Nitelikleri

Kaynak, iki materyalin tek bir materyal elde edilecek bir şekilde birleştirilmesi işlemidir. Çok sayıda araştırma ve uygulama, lazer kaynağının hassas ve yüksek kalitede bir birleştirme sağladığını göstermiştir. Bu olgu, bilimde araştırılması gereken bir alan olduğu kadar, teknolojiye ise uygulanması ve geliştirilmesi gereken bir malzeme işleme yöntemi haline gelmiştir. Diğer kaynak yöntemlerine nazaran lazer kaynağına üstünlük kazandıran en önemli nitelikler aşağıdakilerdir:

- Lazer, temiz bir enerji kaynağıdır,
- Kaynak işlemi, dolgu malzemesi kullanmadan/kullanılarak gerçekleştirilebilir,
- Kaynak işlemi, yüksek oranda en:boy değişiminde ve dar bir alanda meydana gelir,
- Kaynak hızı yüksektir,
- Lazer kaynak işlemi kolaylıkla otomasyona tabi tutulabilir,
- Aynı ve farklı metaller kaynatılabilir,
- Optik olarak geçirgen (şeffaf, saydam) materyallerin yardımı ile kaynak ortamındaki hava şartları kontrol edilebilir.

Lazer kaynağı işleminin bazı kusurları da vardır. Sert metallerin darbeli lazerlerle kaynatılması, kaynak bölgesinde mikroskopik kaynak kesintilerin oluşmasına, bu ise kaynağın kırılğan olmasına sebep olmaktadır. Ancak bu kusur, geleneksel kaynak yöntemlerinin aynı tipten olan kusurları ile mukayese edildiğinde önemsiz bile görülebilir. Yukarıda gösterilen sebeplerden dolayı gün geçtikçe lazer kaynağının endüstride kullanım alanı artmaktadır.

Lazer kaynağı, teknolojik şartlara bağlı olarak, iki temel prensipten birini esas alarak gerçekleştirilmektedir:

- Derinlemesine nüfuz eden lazer kaynağı (Key Hole Laser Welding)
- İletim lazer kaynağı (Conduction laser welding)

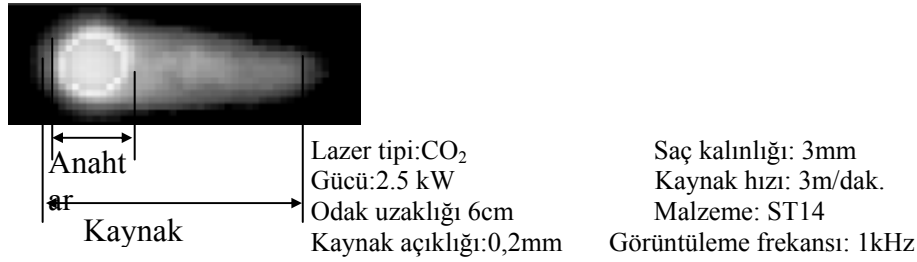
Yüksek güçlü lazerlerin en önemli uygulama alanlarından biri, sac malzemelerin kaynatılması işlemidir. Bu tür kaynağın en geniş ve vazgeçilmez uygulama alanı otomobil sektörüdür. Bu alan lazerle imalat teknolojisi pazarının % 30'unu kapsamaktadır [1]. Bunun dışında, değişik amaçlı sac malzemelerin birleştirilmesi için de lazer kaynağı kullanılmakta ve lazerlerin bu alanda uygulanması hızla genişlenmektedir [2].

2. Derinlemesine Nüfuz Eden Lazer Kaynağı

Derinlemesine nüfuz yöntemi (*Key Hole Laser Welding*) ile elde edilen lazer kaynağına *Anahtar Deliği* (klavuz çukur) manasına gelen "KEY HOLE" yöntemi de denir. Eğer, yeterince güç yoğunluğuna sahip olan lazer ışın demeti malzeme yüzeyine odaklanırsa anahtar deliği elde edilir [3]. Işın demeti ile materyal buharlaştırılarak bir anahtar deliği oluşturulabilir [4]. Bu anahtar deliğinin oluştuğu yerde bir erime havuzu elde edilir. Söz konusu yerde eriyik halde bulunan malzeme yer çekimi, yüzey gerilmesi

ve buhar basıncının etkisi ile kararlı bir dengede bulunur. *Anahtar Deliği* mekanizmasında 1:10 oranında en:boy (derinlik, b/h) değişimi söz konusu olur. Bu mekanizmanın ayrıntıları Lancaster [5] tarafından bulunmuş ve uygulamada kullanılabilecek bir konuma getirilmiştir.

Anahtar Deliği, eriyen metal ve bunların dışını çevreleyen katı metalden oluşur. Bu delikte oluşan buhar basıncı, eriyen malzemenin yüzey gerilimi ve eriyen metalin hidrostatik basıncı ile dengelenir. Şekil 1'de CMOS kameradan elde edilen anahtar deliği kaynağı görüntüsü verilmiştir [6].



Şekil 1. CMOS Kameradan alınan anahtar deliği lazer kaynağı işlemi görüntüsü

Yukarıda söylenildiği gibi, lazer ışın demeti ile materyal buharlaştırılarak *Anahtar Deliği* denilen bir çukur oluşturulur. Anahtar deliği oluştuktan sonra delik bölgesindeki eriyen malzemenin lazer ışını yutma oranı % 98 'e ulaşır [7] ve burada bir erime havuzu oluşur. Bundan sonra, iş parçası veya ışın demeti sabit bir hızla hareket ettirilmeğe 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 katılaştır. Uygulanan lazer ışın demetinin gücü, seçilmiş olan hareket hızında metali eritecek kadar büyük, ama çukurdaki metali buharlaştırıp yok etmeyecek kadar düşük olarak seçilmelidir. Ayrıca, kaynak çukuru oluşunca, malzeme yüzeyine çarpan ışın gücünün kontrollü bir şekilde azaltılması gerekir.

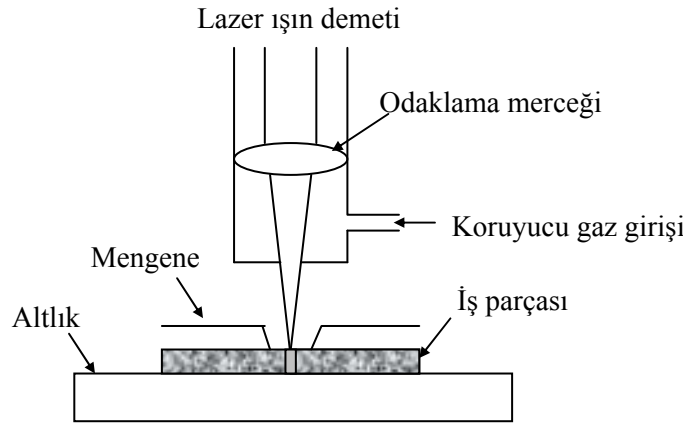
Kaynak çukuru oluşturarak malzemelerin kaynatılması işlemi, özellikle kalın saçların kaynak edilmesi için uygun olan bir yöntemdir. Bu yöntemin performansı saçın kalınlığına çok bağlıdır. Mesela, 0,1 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik saç, 1200 W lazer gücünde 20 m/dak hız ile kaynatılabildiği halde, 1,55 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik 2250 W lazer gücünde ve sadece 3 m/dak hız ile kaynatılabildiği [8].

3. İletimsel Lazer Kaynağı

Malzemelerin kaynatılmasında kullanılan lazer iletim (*Conduction laser welding*) prensibinin ana fiziksel temeli, malzemenin lazer ışın enerjisini yutarak, kaynama noktasına ulaşabilmesidir. Kaynama noktasına ulaşan malzemelere uygulanan

sabit bir kuvvet, bu malzemelerde birleşmeye sebep olur. İletimsel lazer kaynağı, lazer güç yoğunluğunun malzemenin kaynama noktasına ulaştırılmasına yetmediği fakat malzemeyi eritebildiği durumlarda kullanılır. Tam olarak derinlemesine nüfuz eden kaynak ise ince malzemelerde yapılabilir. İletim lazer kaynağında dikiş formunun yüksek oranda en boy oranına sahip olması mümkün değildir. Eğer yüksek güç yoğunluklu lazerler kullanılarak ince metallerin kaynatılması istenirse kaynatma yerine kesme işlemi oluşur. Bazı araştırmalar, iletim lazer kaynağının kalınlığı 0,5 mm'nin altında olan saç malzemelerin kaynatılması için uygun olduğunu gösteriyor [9].

İletimli lazer kaynağı Şekil 2.'de gösterilen düzenekle, ince metallerin kaynatılmasında kullanılır. Genellikle iş parçası yüzeyinin altına odaklanan lazer ışın demeti yüzeye çarpar. Bu demetin bir kısmı malzeme tarafından yutulur bir kısmı ise yansıtılır. Malzeme tarafından yutulan yüksek güçlü ve kısa süreli lazer ışın darbeleri sayesinde meydana çıkan ısı, konveksiyon ve radyasyon şeklinde yayılma imkanı bulmadan iletim yolu ile malzemenin kalınlık eksenine boyunca derinliklere yayılır. Bu yüzden malzemenin odak lekesi çapındaki silindirik kısmın derinlik boyunca sıcaklığının aynı olduğu kabul edilmektedir. Lazer ışık enerjisini yutarak eriyen metalin oluşturduğu kaynak çukuru, lazer ışın demetinin uzaklaştırılması ile katılaştır.



Şekil 2 İletimsel lazer kaynağı için kullanılan yaygın bir düzenek

4. Lazer Kaynağı Sırasında Metalin Oksitlenmeden Korunması

Eriyen metalin oksitlenmesini önlemek için koruyucu gaz kullanmak gerekir. Lazer ışın demeti ve koruyucu gaz kenarlara açılan delikler ile iş parçası üzerine yönlendirilebilir. Bu amaçla en yaygın olarak argon veya helyum gazlarının CO₂ gazı ile karışımı kullanılmaktadır [10].

5. Lazer Kaynak Kalitesini Etkileyen Parametreler

Lazer iletim kaynağının kalitesini etkileyen esas parametreler şunlardan oluşmaktadır. Lazerin dalga boyu ve kullanılan merceklerin lazer demetini yutma oranı,

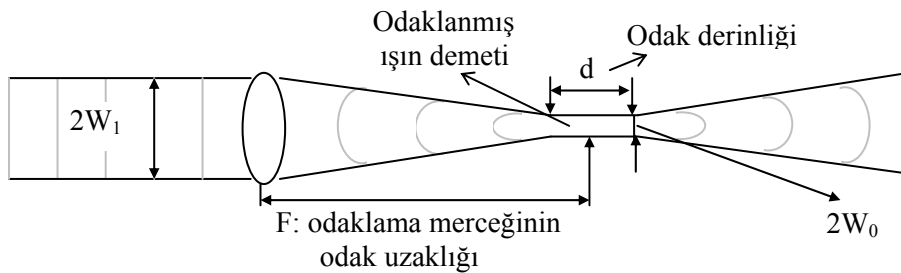
Lazer ışının gücü, Lazer ışınının leke boyutu, Lazerin çalışma modu (Sürekli dalga veya darbeli), Lazer ışınının odak uzaklığı ve odak noktası, İş Parçasının kimyasal bileşimi, İş parçasının fiziksel geometrisi, İş parçasının kalınlığı, İş parçasının yüzey durumu, Koruyucu Gaz: Karışım oranı, akış hızı, basınç, meme boyutu ve pozisyonu, Kaynak karakteristiği: Kaynak hızı, birleştirme geometrisi, aralık toleransı.

Kaynağın malzemeye nüfuz derinliği güç yoğunluğu ve kaynak hızına bağlıdır. Malzemeye uygulanan güç yoğunluğu arttıkça ve kaynak hızı azaldıkça nüfuz derinliği artar. İlk önce üretim hızının olması gereken en alt hız değeri başlangıç kaynak hızı olarak seçilir. Bu hızda istenen nüfuz derinliğini sağlayan lazer çıkış gücü belirlenir. Malzemeye en uygun olan güç yoğunluğu ise denemeler sonucunda bulunur. Genellikle lazer kaynağı için gerekli işlem parametreleri seçilirken teoriler üzerinden, denemelerden ve geçmişte yapılan deneyimlerden faydalanılır. Teorik hesaplamaların ışığında, çeşitli parametreler için değişik değerler denenerek en uygun olanı seçilir. Kaynak hızının, iş parçasına uygulanan güç yoğunluğunun ve odak noktasının yanlış seçilmesi, merceğin kirliliği, gerek kaynak ortamının sağlanmaması vs. gibi hatalar kaynağın bozuk olmasına sebep olmaktadır.

5.1 Lazer ışının leke çapı

Bir çok işlemlerde çok küçük bir alana yüksek bir güç yoğunluğunun uygulanması gerekir. Lazer ışın demetinin mikronluk bir alana odaklanabilir olması, bu talebi karşılayan teknolojik araçlar arasında lazerlerin bir ayrıcalığa sahip olmasını sağlamaktadır.

Lazer ışın demetinin odaklanma kalitesi, çaprazlama elektromanyetik moduna (Transverse Electro-magnetic Mode: TEM) bağlıdır. İdeal bir lazer ışın demetinin kesitindeki enerji dağılımı Gausyendir. Gerçek bir lazerin elde edildiği optik çukurun özelliklerine bağlı olarak demet kesitindeki enerji dağılımı Gausyenlikten sapmalar göstermektedir. Lazer demetinin ideal durumdan sapması demet kalitesi olarak tanımlanır ve M^2 ile sembolize edilir. TEM lazer ışın demetinin kesiti boyunca enerji dağılımını karakterize etmektedir. TEM_{0,0}, $M^2 = 1$ olan ideal bir Gausyen demettir ve çok küçük bir leke çapında odaklanarak en yüksek güç yoğunluğu sağlamaktadır. Şekil 3'de lazer ışın demetinin odaklanması gösterilmiştir. TEM₀₀ modunda üretilen ve Gausyen dağılıma sahip olan bir ışın demeti odaklandığında elde edilen odak leke çapı formül 1'den hesaplanabilir [11].



Şekil 3. $2W_1$ demet çapındaki TEM₀₀ modlu lazer ışın demetinin odaklanması

$$W_0 = \frac{\lambda \cdot f}{\pi W_1} \quad (1)$$

Burada; λ : Işın demetinin dalga boyu, f : Odaklama merceğinin odak uzaklığı, W_1 : Merceğe çarpan demetin yarı çapı, W_0 : Merceğin odak uzaklığında meydana gelen lekenin yarı çapıdır.

Lazer demet kalitesinin $M^2 > 1$ olması durumu düşük kalite veya yüksek dereceli demet olarak adlandırılır. Pratikte lazer kaynaklarının çoğunda M^2 değeri 1'den büyüktür. Odaklanan lazer ışının demet çapı (D_b); lazer ışınının dalga boyu (λ), lazer ışın demetinin odaklanabilirliği (M^2), merceğin odak uzaklığı (f) ve odak mesafesinde elde edilen lekenin çapı (D) değişkenlerine bağlı olarak hesaplanabilir. Aralarındaki ilişki formül 2'de verilmiştir [11].

$$D_b = M^2 \frac{4\lambda f}{\pi D} \quad (2)$$

5.2 Lazer ışının odak derinliği

Odaklanan ışın demetinin odak leke çapı, odak bölgesinin belirli bir bölgesinde yaklaşık olarak sabit kalır. Odak leke çapının yaklaşık olarak sabit kaldığı mesafeye odak derinliği denir. Materyal işlemede odak leke çapının iş parçası üzerindeki pozisyonu çok iyi bir şekilde tayin edilmesi gerekir. Odak leke çapının derinliği ışın demetinin mod şekline bağlı olarak değişir. Gausyen ışın demeti dağılımındaki odak derinliği formül 3'den hesaplanabilir [11].

$$d = \frac{2\lambda}{\pi} \sqrt{\rho^2 - 1} \left(\frac{f}{w_1} \right)^2 \quad (3)$$

Formülde d : odak derinliği (m), λ : Lazer ışın demetinin dalga boyu, ρ : tolerans faktörü, f : Kullanılan odaklama merceğinin odak uzaklığı, W_1 : Odaklama merceğine çarpan ışının demetinin yarı çapıdır. Tolerans faktörü (ρ) odaklama leke çapının % 10'undan fazla olamaz. Bu değer genellikle % 5'i geçmez. Formül 4 kullanılarak, odak derinliği, odak leke çapından da hesaplanabilir [11].

$$d = \frac{2\pi}{\lambda} W_0^2 \sqrt{\rho^2 - 1} \quad (4)$$

Gausyen olmayan lazer ışın demetinin odak derinliği formül 5'den hesaplanabilir. Odak derinliği iş parçasının işlem esnasındaki tolerans durumundan hesaplanır [11].

$$L = \sqrt{(P+1)^2 - 1} \frac{\pi D_b^2}{2\lambda M^2} \quad (5)$$

5.3 Lazer ışının güç yoğunluğu

Malzeme üzerinde bir işlem yapmak için lazer cihazının gücünden daha ziyade, malzemeye uygulanan güç yoğunluğu önemlidir. Lazer ışınının *Güç Yoğunluğu* (P_d), birim alana düşen ışın demet gücüne denir. Lazer ışınlarının uyumluluğu (Coherence), ve ışın demetinin odaklanabilmesi çok büyük güç yoğunluğunun elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Güç yoğunluğu formül 6'dan hesaplanır.

$$P_d = \frac{4P_{in}}{\pi D_b^2} \quad (6)$$

Burada P_d : Odaklanmış güç yoğunluğu, P_{in} : Işın demetinin gücü, D_b : Odak leke çapıdır.

Derinlemesine nüfuz eden kaynak modunun başlangıcında, anahtar deliği formunu elde etmek için malzemeye yeterince güç yoğunluğunun uygulanması gerekir. Denklem 6'da görüldüğü gibi, güç yoğunluğu lazer ışın demetinin gücü ve ışın demetinin odak çapına bağlıdır. Nüfuz derinliği güç yoğunluğunun azalması ve ışın demetinin odak leke çapının artması ile düşer. Mevcut lazerler, termik imalat için gerekli olan güç yoğunluklarını sağlayabildikleri için, materyaller üzerinde kesme, dar bölgede eritme ve başka ısı işlemlerin yapılmasını mümkün kılmaktadırlar.

5.4 Malzeme parametreleri

Metaller, lazer ışığını 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 açılabilir. Paslanmaz çelik saç lazer ışın demetinin % 98'ini yansır [8]. 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 çarpmasında meydana gelmektedir. Lazer kaynağında iş parçasına transfer edilen ısı miktarı, bu parça tarafından yutulan enerjiden hesaplanabilir. Malzemenin odak lekesi çaplı silindirik kısmına aktarılarak ısıya dönüşen enerji, malzemede ısı yayılmaya sebep olur. Malzemenin ısı yayma katsayısı formül 7'den hesaplanır.

$$k = \frac{K}{\rho c} \quad (7)$$

Formülde: K : Malzemenin ısı iletkenliği, ρ : Malzemenin yoğunluğu, c : Malzemenin özgül ısıdır. Malzemeye belli bir süre uygulanan lazer ışın demetinin tek boyutta malzemeye nüfuz etme derinliği ise Formül 8'den hesaplanabilir.

$$d = 2(kt)^{1/2} \quad (8)$$

Formülde t : Malzemeye lazer ışın demetinin uygulanma süresi, d : Malzemeye nüfuz derinliğidir (sıcaklığı yüzey sıcaklığının % 37'sine eşit olan derinlik). Formül 8'den bir lazer ışın darbesi süresinde lazer ışın demetinin malzemeye nüfuz etme derinliği hesaplanabilir. Bu formülden de anlaşıldığı gibi, lazer darbesinin süresi t , arttıkça ışın demetinin malzemeye nüfuz etme derinliği de $t^{1/2}$ ile orantılı olarak artmaktadır. Mesela, darbe süresi 1 ms olan Nd:YAG lazer ışınının malzemeye nüfuz etme derinliği 0.1 μ m iken, Q anahtarlaması ile darbe süresi 100ns yapıldığında malzemeye nüfuz derinliği 1 μ m olarak ölçülmüştür [12].

5.5 Lazer ışın demetinin metal malzemeler tarafından yutulması

Metallerin kızıl ötesi ışınları yutma oranı, büyük bir ölçüde iletimde olan serbest elektronların yutma oranına bağlıdır. Bu sebepten yutma olayı, taban malzemenin elektriksel direncinin fonksiyonu olarak meydana çıkmaktadır. Yutma oranı, aynı zamanda sıcaklık ve yüzey şartlarına da bağlıdır. Çizelge 1.'de gösterildiği gibi bu oran, metallerin oksitli bölgelerinde çok daha yüksek olur [13]. Çizelge 2'de, örnek olarak, bazı metallerin 10,6 μ m dalga boyundaki ışınları yutma katsayıları gösterilmiştir.

Çizelge 1. Yüzeyi oksitli ve oksitsiz metallerin lazeri yutma katsayıları

Metal	Yutma katsayısı	
	Temiz Yüzey	Oksitlenmiş yüzey
Altın	0.010	-
Alüminyum	0.034	0.25-0.50
Demir	0.050	0.33-0.74
Zirkonyum	0.083	0.45-0.56
Titanyum	0.094	0.18-0.25

Çizelge 2. Lazer tipine bağlı olarak metallerin ışını yutma katsayısı

Metal	Lazer tipi	
	Nd:YAG (1064 nm)	CO ₂ (10,6 μ m)
Alüminyum	0,08	0,019
Bakır	0,10	0,015
Nikel	0,26	0,03
Platin	0,11	0,036
Gümüş	0,04	0,014
Titanyum	0,42	0,080
Çinko	0,16	0,027

Genellikle metallerin kızıl ötesi bölgedeki enerjiyi oda sıcaklığında yutma kabiliyetleri azdır. Enerji transferi sonucu malzemede anahtar deliği formu oluştuğunda bu form içinde çok sayıda yansımalarından dolayı yutma oranı da hızla artar.

Üzerinde kaynak işlemi yapılacak olan metallerin yutma ve termal nitelikleri ve bunlar arasındaki ilişkilere bağlı olarak CO₂, Coil (Chemical Oxygen – Iodine Laser) ve Nd:YAG lazerlerden biri tercih edilir.

Metallerde malzeme sıcaklığına bağlı olarak malzemenin yutma katsayısı da değişmektedir. Çizelge 2'de Nd:YAG ve CO₂ lazerler için değişik malzemelere ait yutma katsayıları verilmiştir. Malzeme sıcaklığının artırılması ile yutma katsayısı Coil ve Nd:YAG lazerlerde 2.84, CO₂ lazerlerde ise 3.16 kere daha fazla olabilmektedir. Saç levhaların oda sıcaklığında soğuk olarak çekilmelerinden dolayı yüzeyleri çok düzgündür, üzerlerinde film tabakası ve oksit bulunmaz. İnce saçları lazer kaynağında iletim modu kaynağı ile kaynatılmasında kılavuz deliği (key hole) kaynağında görülen çok yönlü yansımalar gözükmez.

Saç metallerin lazer ışınlarını yutma kabiliyeti; metalin parlaklığına, optik özelliklerine ve bulunduğu sıcaklığa bağlıdır[14].

5.6 Malzemeyi lazer ışın demeti ile işlemek için gereken darbe gücünün ve süresinin belirlenmesi

Yüksek güçlü lazerlerin endüstriyel uygulamaları için metalleri kaynak etmek, kesmek, sertleştirmek ve metal alaşımları elde edilmek amacı ile kullanılabilir çok sayıda araştırmalar yapılmış ve uygun metotlar geliştirilmiştir [15,16,17,18,19,20]. Dahası, bu metotlarla çalışma sırasında, lazer cihazının meydana getirdiği hareketli ışının malzeme üzerinde yayılımında ortaya çıkabilecek problemlerinin üstesinden gelmek için temel çözüm yolları gösterilmiştir [21].

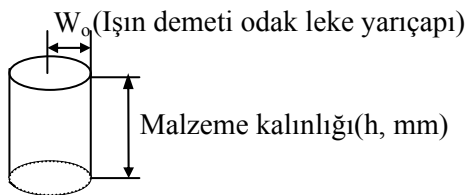
Eğer işlenecek malzemeye uygun lazer seçimi yapılmazsa malzemeye çarpan lazer ışın demetinin malzeme tarafından yutulan kısmı gerçekleştirilmek istenen işlem için yetersiz kalabilir. Malzemenin dalga boyuna ait yutma grafiğinden faydalanılarak söz konusu malzeme için uygun lazer seçimi yapılabilir. Malzeme işlemede, materyalin ısı iletkenliği ve ısı kapasitesi önemli parametrelerdir. Çünkü, malzemenin kalınlığı ve ısı iletkenliğinin değeri yükseldikçe lazer ile işlenmesi de zorlaşır.

Kaynak işlemini gerçekleştirmek için materyale uygulanacak olan lazer darbesinin süresi malzemenin cinsine bağlı olarak değişmektedir. Değişik malzemeler için bu sürenin sınırları çizelge 3.'de verilmiştir. Genişliği gösterilen sınırlar içerisinde seçilmiş, gücü formül 12 ile hesaplanmış olan darbenin gücü arttıkça erime derinliği de artmaktadır. Hatırlatalım ki, darbe genişliğini azaltmak ve enerji yoğunluğunu yükseltmek yolu ile erime çukurunun derinliğini artırmak bir sonuç vermez, yalnız malzemenin buharlaşması hızlandırılabilir.

Çizelge 3. Metale bağlı darbe süreleri

Malzeme	Optimum darbe genişliği (s)
Demir	$10^{-4} < \tau_i < 5 \times 10^{-4}$
Alüminyum	$5 \times 10^{-4} < \tau_i < 2 \times 10^{-3}$
Çelik	$5 \times 10^{-3} < \tau_i < 8 \times 10^{-3}$

i) Eriyecek olan malzemenin kütlesi ;



Şekil 4. Odak leke çapındaki malzemenin silindirik modeli

Görüldüğü gibi, her bir malzeme için aşılması gereken darbe genişliği sınırları vardır ve bu çerçevede bir değer optimum olarak seçilmesi tecrübe ile tespit edilir. Malzemenin odak leke çapındaki silindirik bir kısmının (erime silindirinin) eritilmesi için gereken enerji ve güç miktarının aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$m = d \cdot h \cdot \pi \cdot W_0^2 \quad (9)$$

Formülde;

m: malzemenin kütlesi (g)

d : materyalin yoğunluğu (g/mm³)

h : malzeme kalınlığı (mm)

W₀: odak lekesinin yarıçapı (mm)

ii). Kütlesi m olan silindirik kısmın erime noktasına ulaşması için yutması gereken enerji;

$$Q = T_m \cdot m \cdot c \quad (10)$$

Formülde; Q : Malzemenin yuttuğu enerji miktarı (Kalori), T_m : Malzemenin erime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), c : Maddenin özgül ısısı (Kalori/g) dır.

iii). Kütlesi m olan silindirik kısmın erime noktasına ulaştırılması için malzemeye uygulanması gereken enerji (11) ve güç (12) ;

$$E_p = \frac{Q \cdot 4.2}{\delta} \quad (11)$$

$$P_p = \frac{E_p}{\tau} \quad (12)$$

Burada; Q : Malzemenin yuttuğu enerji miktarı (Kalori), δ : malzemenin yutma katsayısı, E_p :Lazer darbesinin enerjisi (J) dir.

Metal alaşımlarının büyük bir kısmının erime noktası 1500°C ila $8545,78^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Malzemenin erime sıcaklığı yerine buharlaşma sıcaklığı seçilecek olursa, meydana gelen ısı malzeme içerisinde yayılmaya fırsat bulmadan erime silindirini buharlaştıracaktır. Bu şekilde kaynak işlemi yerine malzemenin kesilmesi söz konusu olacaktır.

5.7 Işın yansımadan dolayı meydana çıkabilecek tehlikelerin önlenmesi

Lazer ışın demetinin fazla miktarda yansması sonucu ortaya çıkan atık enerji, etrafta bulunan cihazlara zarar verebilir. Eğer gerekli önlemler alınmazsa söz konusu enerji insanların yaralanmasına bile sebep olabilir. Yüksek güçlü lazerlerin kullanımında güçlü yansımalar yüzünden etrafa verilebilecek zararları bertaraf etmek için ek harcamalar yapılarak söz konusu tehlikelerin önlenmesi gerekir. Bu tür ortamlarda çalışacak insanların daha dikkatli olmaları sağlanarak da kısmen lazer ışın demeti yansımalarının verebileceği zararlar önenebilir.

Lazer üretici firmalar, ürettikleri cihazları kullanma kitapçığında, malzemelerin işlenmesine yönelik bazı pratik değerler verirler. Eğer üzerinde çalışılacak malzemeye ait bir uygulama mevcut değilse farklı tip lazer cihazlar test edilerek işlenecek malzemeye uygun lazer seçimi yapılabilir.

Lazer ışın demetinin malzeme yüzeyini bozduğu bölgedeki gerilmeler yüksek yoğunluklu elektro manyetik dalgaların yayılmasına neden olur. Bu sebepten bazı durumlarda, malzeme yüzeyinde küçük patlamalar meydana gelebilir. Bu patlamalar, malzemenin odak bölgesinde ki sıcaklığının çok yüksek değerlere ulaşmasına sebep olur.

5.8 Lazer gücü ve kaynak hızı arasındaki ilişkinin belirlenmesi

Lazer güç eşleştirme veriminin tahmini değerinin hesaplanmasında lazer kaynağı için geçerli olan boyutsuz parametreler kullanılır [22]. Normalleştirilmiş güç (formül 13) ve hız (formül 14) olmak üzere iki boyutsuz parametre kullanılmaktadır.

$$\text{Normalleştirilmiş güç, } X = \frac{P}{t} K.T_m \quad (13)$$

$$\text{Normalleştirilmiş hız, } Y = \frac{v.W}{\alpha} \quad (14)$$

Formülde ; v : Kaynak hızı, W : Kaynak derinliği, α : Isıl yayılma, P : Metal tarafından yutulan lazer gücü, t : Metal sacın kalınlığı, K : Isıl iletim katsayısı, T_m : Metalin erime sıcaklığıdır. Yüksek kaynak hızlarında bu iki parametre arasındaki ilişki formül 15'de verildiği gibidir [22].

$$Y = 0,483.X \quad (15)$$

Düşük kaynak hızlarında iki parametre arasındaki ilişki formül 16'da verildiği gibidir.

$$\frac{6,3}{X} = \ln\left(\frac{4,5}{Y}\right) \quad (16)$$

Lazer güç eşleştirme verimi, paslanmaz çelik sac levhaların iletim lazer kaynağı ile kaynatılmasında %15-17 arasındadır ve bu değer, paslanmaz çelik malzemenin lazer ışın demetini yutma değerine (% 14) çok yakındır [23].

Anahtar deliği kaynağında lazer güç eşleştirmesi % 65 olup oldukça yüksek sayılmaktadır. Söz konusu değer yüksek olmasının sebebi, anahtar deliği kaynağının yutmasının büyük olması ve kaynak işleminin çoklu iç yansımalar altında meydana gelmesidir. Düşük hızda iletim kaynağı ile kaynak işlemini gerçekleştirmeye nazaran yüksek hızlarda gerçekleştirilen anahtar deliği kaynağı işleminde enerji kayıpları oldukça düşüktür.

İletim lazer kaynağı modunda lazer güç eşleştirme verimini artırmak için yüzeyin ön oksitlendirilmesi ve dolgu malzemesi tozlarının kullanılması önerilmiştir [23]. Lazer ışın demetinin malzeme tarafından yutulması ön oksitlendirme veya kimyasal korozyon ile % 30, kaynak bölgesinde uygun dolgu malzemesi kullanarak %50 artmaktadır [8].

Kaynaklar:

- [1] **Irving**, B., Laser Beam Welding Shifts into High Gear, Welding Journal. Vol. 76, No. IK, pp.35-40,1997
- [2] **Kagan**,V., Bray R.G.,” Advantages and Limitations of Laser Welding Technology for Semi-Crystalline Reinforced Plastic”, www.honeywell.com.
- [3] **Beersiek**, J., “On-line Monitoring of Key Hole Instabilities During Laser Beam Welding”, Prometec GmbH, Aachen, Germany, ICALEO’99, Welding Monitor, 2000
- [4] **Arata**, Y., Challenge of Laser Advanced Materials Processing. Proc. Con. Laser Advanced Materials Processing LAMP’87, Osaka. May 1987. Japan High Temperature Society, pp. 3-11, 1987
- [5] **Lancaster**, J. F.,*The Physics of Welding* 2nd ed, Oxford, Pergamon Press, pp. 306., 1986
- [6] **Beersiek**, J., “ On-line Monitoring of Keyhole instabilities during Laser Beam Welding”, Prometec GmbH, Aachen, Germany, ICALEO 99, 1999
- [7] **Steen**,W.M., Laser Materials Processing. 2nd edition, London Springer-Verlag, pp.206,1998
- [8] **Nath**, A.K., Sridhar R., Ganesh and Kaul R., “Laser Power Coupling Efficiency in Conduction and Keyhole Welding of Austenitic Stainless Steel”, Sādhanā Vol.27, Part 3, June 2002, pp.383-392, Printed in Indiana, 2002
- [9] **Noaker**, P. M., Lasers Penetrate Fabricating. Manufacturing Engineering, October, 1993, pp. 33-40, 1993
- [10] **Abbott**, D. H, and Albright C. E. CO₂ Shielding Gas Effects in Laser Welding Mild Steel, Journal of Laser Applications. Vol. 6. pp. 69-80., 1994
- [11] **O’Shea**, D.C., W.Russell and Rhodes,William T., Introduction to Lasers and Their applications. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Co., 1978.
- [12] **Chen** X, Lotshaw W.T., Ortiz A.L., Staver P.R., Erikson C.E., McLaughlin M.H., Rockstroh T.J., Journal of Laser Apply., 8, p.233, 1996
- [13] **Grigoryants**, A.G., Basics of Laser Material Processing,CRC Press,Boca Raton, FL,Cht. 4, 1994
- [14] **Steen**, W.M., Laser Materials Processing, Spr.-Verlag. NewYork, pp.47-48, 1991
- [15] **Breinan**, E.H., Kear B.H., Banas C.H., Physics today, 29, 11, pp.44., 1976
- [16] **Esposito**, C., Daurelio G., Cingoloni A., Optics Lasers Engineering., 3,pp.139, 1982
- [17] **Hegge**,H.J.,De Beurs H.,Nosrdhuis J.,J. TH.M. De Hosson, Metall. Trans., 21 A, PP.987, 1990
- [18] **Powell**, J., Proc. Conf. Laser 5, IITT, Internation, Gournay-sur-Marue, pp.54-71, 1989
- [19] **Roesserler**, D.M., in Industrial Laser Annual Handbook (ed. by D. Belforte and M. Leoitt), Pern Well Bodis Tuba, pp. 16-30, 1986
- [20] **Willis**, J.B., Proc. 1ST Int. Conf. Laser in Manufacturing, IFS, Bedford, pp.53-62, 1983 Breinan E.H.,1976,
- [21] **Gonsalves**, J.N., Duley W.W., Cutting Thin Metal Sheets with The CW CO₂ Laser, J. Apply.Phys., Vol. 43, No 11, pp. 4684-4687, 1972
- [22] **Steen**, W. M., Laser Materials Processing. 2nd edt., Springer-Verlag, pp.206,1998
- [23] **Xie**, J. and Kar A., Melting and Vaporization for Large-area Film Removal with a Chemical Oxygen-iodine Laser. Journal of Applied Physics, Vol. 82, No. 10. pp. 4744-4751, 1997